

工學碩士 學位論文

釜山松島海水浴場의 沿岸整備事業에 따른
海水浴場의 海濱變形 및 海岸環境變化의 豫測

Prediction of Beach Profile Variation and Coastal Environmental Change
According to the Coastal Improvement Work of Songdo Beach in Busan

指導教授 金 度 三

2006年 8月

韓國海洋大學校 大學院

土木環境工學科

黃 龍 台

本 論文을 黃龍台의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

委員長 工學博士 金 殆 坤 (印)

委 員 工學博士 金 泰 亨 (印)

委 員 工學博士 金 度 三 (印)

2006年 8月

韓國海洋大學校 大學院

土木環境工學科 黃 龍 台

**Prediction of Beach Profile Variation and Coastal
Environmental Change According to the Coastal Improvement
Work of Songdo Beach in Busan**

by
Yong Tae Hwang

**Department of Civil and Environment Engineering
Graduate School
Korea Maritime University**

ABSTRACT

Recently, beach erosion has been frequently happening around Korea due to several causes such as typhoon and storm surge which accompany the severe water waves by the global warming and the oceanic environment change. It is necessary to carry out countermeasure as fast as possible because the beach erosion effects on both social problems and economical side. Especially, in the past time, Songdo swimming beach which is located at Busan was our country's the first swimming beach and was famous for tourist resort with a graceful seashore environment. Nowadays, a primary role of Songdo swimming beach has been badly effected due to beach erosion according to the typhoon and severe water waves. In addition, a serious sea pollution due to coastal development such as construction of a road come in matter. In the present, as a national policy of MMAF(Ministry of Maritime Affairs and Fisheries),

coastal improvement work of Songdo beach is planed and is being in force in order to prevent beach erosion and develop natural beach. As this project results, establishment of beach nourishment and shore structures such as groin and submerged breakwater were completed in 2005. And this project will begin construction in order of year until 2007.

The aim of this study is to predict of beach profile variation and coastal environmental change according to the coastal improvement work of Songdo beach. Moreover, it is studied the efficiency of applied countermeasure in this project and long-term monitering for the coastal environmental change of Songdo beach has been accomplished through several coastal investigations such as long-term wave, sediment transport, and shoreline variation in order to maintain the beach more effectively as well as numerical model test. These research results will be application to previously prevent badly effect after the construction of countermeasure and to take measure for minimal damage in case of coastal disaster. Based on the results of long-term monitering, an estimation about a direction or an indirection effect which have an effect on near a sea area according to the coastal improvement work of Songdo beach can be previously prevent second damage which was not expect in case of design. Also, these estimation can be use to protection of natural environment and formation of amenity environment as well as protection beach erosion of swimming beach from natural disaster.

釜山松島海水浴場の沿岸整備事業에 따른 海水浴場の 海濱變形 및 海岸環境變化의 豫測

黃 龍 台

韓國海洋大學校 大學院
土木環境工學科

요 약

최근, 우리나라는 지구온난화 및 변화된 해양환경의 영향으로 고파랑을 동반한 태풍 및 폭풍해일 등으로 인하여 해안침식이 빈번히 발생되고 있다. 해안침식 현상은 사회적인 문제뿐만 아니라 경제적인 측면에도 큰 영향을 미칠 수 있기 때문에 가능한 빠른 시일 내에 방지대책이 수립되어야 한다. 특히, 우리나라 최초의 해수욕장으로 개발된 부산 송도해수욕장은 과거 수려한 해양환경을 바탕으로 관광지로 유명한 곳이었다. 그러나 오늘날 부산 송도해수욕장은 해안개발에 따른 심각한 해양오염과 태풍 및 고파랑으로 인한 해안침식으로 해수욕장의 기능을 상실하게 되었다. 현재 해양수산부의 국책사업으로 부산 송도해수욕장의 사빈유실을 방지하고 친환경적인 해안을 개발하기 위한 연안정비사업이 계획되고 시행 중에 있다. 그 성과로 2005년 현재 양빈 및 잠제, 이안제의 설치가 완료된 상태이며 2007년까지 연차적으로 연안정비사업이 수행될 예정이다.

이상과 같이 송도연안정비사업에 따른 향후 예상되는 해수욕장의 해빈변형 및 해양환경변화를 예측하는 것을 본 연구의 목적으로 한다. 더불어 송도연안정비사업에 적용된 해안침식 방지시설의 효용성 등을 파악하고, 보다 효율적인 해안관리를 위하여 수치모형실험 뿐만 아니라 장기적인 파랑, 표사 이동 및 해안선 변화조사 등의 각종 해양조사를 통한 장기간의 모니터링 조사를 수행하고 있다. 이로부터 시행후 공사로 인한 악영향을 사전에 예방하고, 해안재해 발생시 이를 최소화

할 수 있는 대책을 수립하는 데에 적용될 수 있을 것이다. 그리고, 모니터링의 결과를 토대로 송도연안침식방지공사 시행에 따른 인근해역에 미치는 직·간접적 영향을 평가하여 설계시 예상하지 못하였던 2차피해를 사전에 예방하여 태풍 및 고파랑으로 인한 자연재해로부터 해수욕장의 사빈유실방지는 물론, 자연환경보전 및 쾌적한 환경을 조성하는 데에도 이용될 수 있을 것이다.

目 次

ABSTRACT	i
要約	iii
目次	v

제1장 서론

1.1 본 연구의 배경	1
1.2 본 연구의 목적	2
1.3 본 연구의 구성	6

제2장 항공사진을 이용한 해안선 변화분석

2.1 개요	7
2.2 Affine Transformation에 의한 해석방법	7
2.2.1 2차원 등각사상변환	7
2.2.2 2차원 부등각사상변환	10
2.2.3 파랑의 처오름 및 조위보정 방법	11
2.3 항공사진의 분석결과	14

제3장 수치모형실험

3.1 파랑에 의한 해빈변형 수치모형실험	20
3.1.1 파랑변형 수치모형실험	20
3.1.2 해빈류 수치모형실험	41
3.1.3 지형변동 수치모형실험	50
3.2 해수유동 및 퇴적물이동 수치모형실험	58
3.2.1 개요	58
3.2.2 사용모형	58

3.2.3 모형수립 및 실험방법	68
3.2.4 실험결과 및 고찰	77
3.3 해안선변화 수치모형실험	84
3.3.1 개요	84
3.3.2 실험조건	85
3.3.3 사용모형	87
3.3.4 실험결과	89
 제4장 결론	
4.1 파랑에 의한 해빈변형 수치모형실험	95
4.2 해수유동 및 퇴적물이동 수치모형실험	96
4.3 해안선변화 수치모형실험	97
<참고문헌>	99

제1장 서론

1.1 본 연구의 배경

과거부터 연안을 갖는 선진국에서는 해역의 특성에 따라 여러 가지 형태로 발생하는 해안재해가 사회적 문제로 인식되어 왔으며, 해안재해 중에서도 표사이동에 기인한 해안침식, 박지 및 항내매몰 등은 모두 파와 흐름이 공존하는 연안에서 발생하는 대표적인 재해로서 정부차원에서 비중있게 다루어지고 있다.

특히, 백사장은 파의 에너지를 감소시키는 해안방재 및 국토보존의 측면과 해양생태계의 유지 및 자연정화조의 역할을 수행하는 환경생태계적인 의미, 그리고 연안경관학적인 측면에서 매우 중요시되고 있다. 더불어, 자연환경 및 관광자원의 소실이라는 관점에서도 해안침식으로부터 백사장을 보호하여야 한다는 주장이 매우 중요한 사회적 이슈로 다루어지고 있는 실정이다. 따라서, 과거부터 연안역의 이용 및 개발이 활발하여 해안침식현상이 우리나라보다 먼저 문제로 된 미국, 프랑스, 일본, 스페인, 네덜란드, 영국, 오스트리아, 뉴질랜드 등의 연안선진국에서는 수 십년 전부터 중앙정부 및 해안에 위치한 지방자치단체가 스스로 대책을 세우고, 막대한 투자를 아끼지 않고 있는 실정이지만, 한번 훼손된 해안을 완전히 복구하는 것은 그리 쉽게 이루어지지 않는 것이 현실이기도 한다.

최근 들어 우리나라도 경제, 사회 및 문화적으로 비약적인 발전을 거듭하면서 그에 수반된 생활공간의 확대 및 관광자원의 개발 등이 해수욕장을 포함한 연안까지 확산되고 있다.

특히, 부산시는 북항 재개발사업, 해운대 해수욕장과 다대포 해수욕장의 복원사업 및 본 연구의 대상인 송도 해수욕장의 복원사업을 위시하여 크루즈선의 유치, 수상비행기, 해상케이블카 설치와 같은 해안관광사업을 부산시의 미래산업으로 인식하여 대대적인 계획, 인프라의 구축 및 투자를 아끼지 않고 있는 상황이다.

그러나, 부산 해안관광의 중심인 해수욕장의 경우에 백사장의 사빈유실

이 매년 증가추세에 있고, 해수욕장을 포함한 심각한 수준의 해안침식 문제가 전국적으로 해안재해의 하나로서 현실화되어 나타나고 있다.

우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸여 있지만, 각각 지역에 따라 그 해양 물리환경적인 특성이 다르며, 외국의 해안특성과는 근본적인 인자들에 있어서 많은 차이점을 내포하고 있다. 따라서, 우리나라의 해안특성과 지역의 해안특성에 적합한 해안침식대책공법이 수립 및 시행되어야 할 것이다. 물론, 경제적인 측면도 대책공법의 적용시에 충분히 함께 고려되어야 할 중요한 요소 중에 하나이다.

부산 송도해수욕장은 사진-1.1과 같이 부산에서 가장 먼저 개발된 해수욕장으로서 하얀 모래와 울창한 소나무 숲이 어우러져 여름이면 많은 관광객이 모여드는 전국적으로 유명한 관광지이었으나, 해수욕장 배후의 해안도로 등과 같은 해안개발과 하계의 태풍내습시 이상파랑으로 인하여 사진-1.2에 나타내는 바와 같이 해수욕장의 모래가 유실되어 왔고, 해수오염 등으로 인하여 사실상 해수욕장의 기능을 상실하게 되었다. 따라서, 관할 중앙 및 자치단체에서 송도연안에서 매년 반복되는 태풍피해 및 해수욕장의 해변유실방지는 물론이고, 친수개념을 도입하여 시민휴식을 위한 녹지공간 조성 등 친환경적인 해변으로 개발하고자 2002년에 송도연안정비사업(부산광역시 서구청, 2002)을 수립하여 2005년 전반기 1차적으로 사업을 완료하였으며, 이에 따라 해수욕장을 개장하여 하계 일일 최대관광객 30만명에 육박하는 관광객이 찾아 해양휴양지로 각광을 받았다.

1차정비사업을 수행함에 있어서 해양조사를 실시하고, 여러 가지의 침식 방지공법에 대해 수리모형실험과 수치모형실험을 실시하였으며, 이러한 결과에 기초하여 잠제, 돌제 및 양빈 등의 면적방호공법을 채택하였고, 현재 사진-1.3에 나타내는 바와 같은 해수욕장으로 변모되었다.

1.2 본 연구의 목적

매년 반복되는 태풍피해를 근본적으로 해결하면서 우리나라 최초의 해수

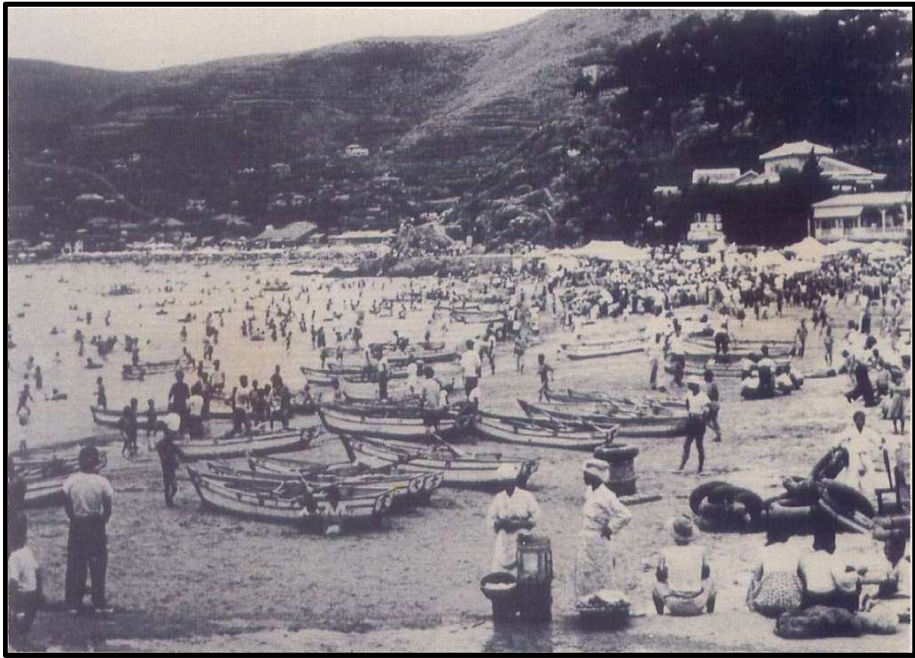


사진-1.1 1920년대의 부산 송도해수욕장



사진-1.2 2002년도의 송도해수욕장(정비전)

욕장으로 개발된 송도해수욕장의 옛 명성을 회복하고, 해수욕장 인근지역을 정비함과 동시에 친수공간으로 조성하기 위하여 해양수산부의 국책사업으로 국내 최초의 연안정비사업을 2002년부터 수행하게 되었다. 연안정비사업에서는 그림-1.1에 나타내는 바와 같이 기존의 해안도로를 확폭하면서 해변을 50m 앞으로 전진시키는 것으로 되어 있다. 그리고, 해변보호를 위하여 그림-1.2에 단면을 나타내고 있는 바와 같이 $210,000m^3$ 의 모래양빈을 실시하고, 전면해역에 그림-1.3에 나타내는 폭 40m의 잠제 2基(길이 100m의 1기와 200m의 1기의 총2기로 구성)를 설치하고, 연안표사를 방지하면서 인근 어항의 매몰을 방지하기 위하여 거북섬 근방에 돌제를 설치하는 것으로 되어 있다.

이상과 같은 松島沿岸整備事業에 따라 향후 예상되는 海水浴場의 海濱變形 및 海岸環境變化를 豫測하는 것이 본 연구의 목적이다. 본 연구의 목적을 수행하기 위하여 검토되는 수치모형실험은 파랑변형 수치모형실험, 해빈류 수치모형실험, 지형변동 수치모형실험, 해수유동 수치모형실험, 퇴적



사진-1.3 2005년도의 송도해수욕장(1차정비후)

물이동 수치모형실험 및 해안선변화 수치모형실험으로 각각 구성된다.

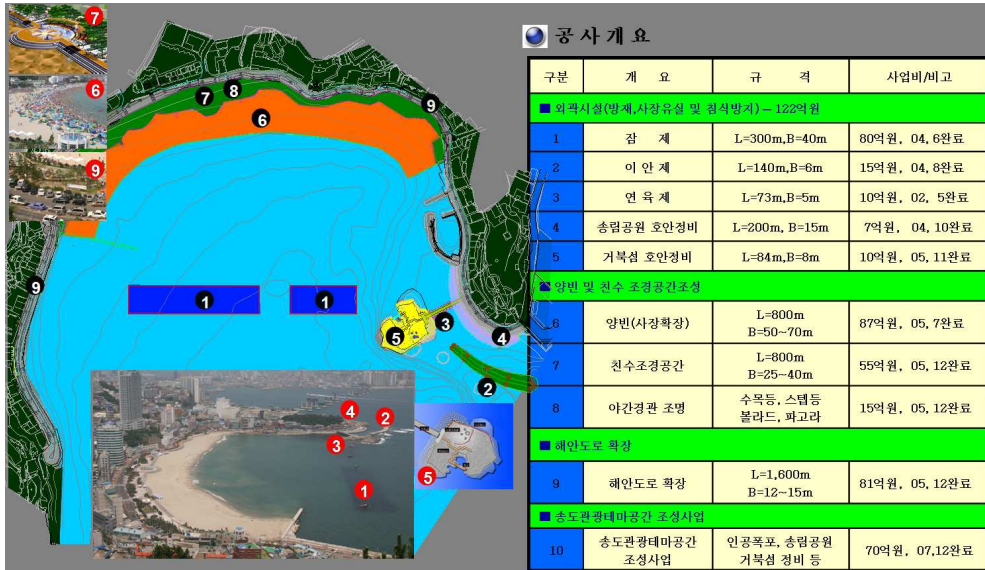


그림-1.1 송도연안정비사업의 공사개요



그림-1.2 송도해수욕장 양빈의 단면(단위:m)

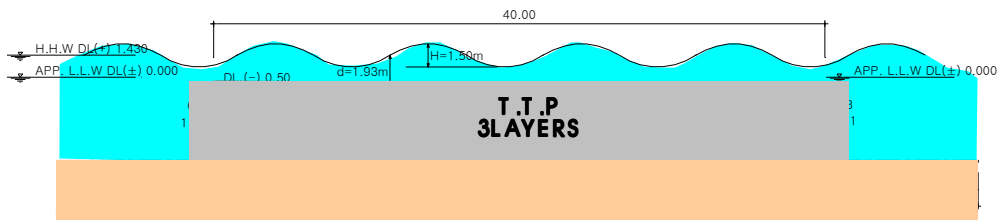


그림-1.3 송도해수욕장 전면해역에 설치되는 잠제의 단면(단위:m)

현재, 송도연안정비사업의 시행과 함께 장기적인 파랑 및 유황조사, 표사 이동 및 해안선 변화조사 등의 각종 해양조사와 수치모형실험을 수행하여 송도연안의 해안환경변화에 대한 모니터링을 실시하고 있으며, 이로부터 공사시행 또는 시행후 공사로 인한 악영향을 사전에 예방하고, 피해발생시 이를 최소화할 수 있는 대책을 수립하는 데에 적용될 수 있을 것이다. 그리고, 모니터링의 결과를 토대로 송도연안침식방지공사 시행에 따른 인근 해역에 미치는 직·간접적 영향을 평가하여 설계시 예상하지 못하였던 2차 피해를 사전에 예방하여 태풍 등 자연재해로부터 해수욕장의 사빈유실방지는 물론, 자연환경보전 및 쾌적한 환경을 조성하는 데에도 이용될 수 있을 것이다.

1.3 본 연구의 구성

본 연구에서는 제1장에 본 연구의 배경과 목적에 대해서 서술하였으며, 제2장에서 기존자료 중에 항공사진으로부터 해안선 변형을 조사하여 침식 및 퇴적상황을 검토하며, 제3장에서는 기술한 양빈단면, 잠제 및 돌제에 대해 파랑변형 수치모형실험, 해빈류 수치모형실험, 지형변동 수치모형실험, 해수유동 수치모형실험, 퇴적물이동 수치모형실험 및 해안선변화 수치모형실험을 실시하여 松島沿岸整備事業에 따라 향후 예상되는 海水浴場의 海濱變形 및 海岸環境變化를 豫測한다. 그리고, 마지막의 제4장에서는 도출된 중요한 사항을 종합하여 본 연구의 결론으로 기술한다.

제2장 항공사진을 이용한 해안선 변화분석

2.1 개요

본 연구에서는 연구대상해역의 해안선 변화유형 및 이력상황 등을 보다 면밀히 검토하여 송도 해수욕장의 해안선 변화특성을 분석하기 위하여 기존 항공사진 자료들을 비교·분석하였다.

년도별 항공사진을 이용하여 해안선의 변화를 검토하기 위해서는 수치정사영상 및 2차원 부등각사상변환인 Affine Transformation방법(정승진, 2002) 등이 보정방법으로 자주 사용된다. 그 중에서 해안선 변화와 같은 특정한 범위의 해석에는 Affine Transformation방법이 비용 및 시간적인 면에서 유리하여 최근 자주 이용되어 지고 있기 때문에 본 연구에서도 Affine Transformation방법을 이용하여 항공사진의 보정을 수행하였다.

항공사진상에서 나타난 해안선은 수제선이 바로 정의에 맞는 해안선이라면 문제가 없으나, 실제로 해수면은 조석현상에 따라 변동을 거듭하므로 촬영당시 항공사진에 나타난 수제선과 실제 해안선의 보정을 수행하여야 한다. 따라서, 국립해양조사원에서 조위자료를 취득하여, 약최고저조면을 기준으로 하여 분석을 수행하였다.

본 조사에서는 대상해역의 항공사진자료를 이용하여 해빈폭의 변화를 검토하였다. 현재까지 입수된 항공사진자료는 국토지리정보원에서 촬영한 1975년 7월, 1982년 5월, 1987년 10월, 1993년 8월, 1996년 11월, 2001년 12월의 항공사진이다.

2.2 Affine Transformation에 의한 해석방법

2.2.1 2차원 등각사상변환(Conformal Transformation)

등각사상변환은 직교기좌표에서 관측된 지표좌표계를 사진좌표계로 변

환할 때 이용된다. 또한, 이 변환은 변환후에도 좌표계의 모양이 변하지 않으며, 이 변환을 위해서는 최소한 2점 이상의 좌표를 알고 있어야 한다.

점의 선택시 가능한 한 멀리 떨어져 있는 점이 변환의 정확도를 향상시키며, 2점 이상의 기준점을 이용하여 최소제곱법을 적용하면 더욱 정확한 해를 얻을 수 있다. 2차원 등각사상변환은 축척변환, 회전변환 및 평행변위의 세 단계로 이루어진다.

(1) 회전변환

동일한 원점 O 를 갖는 두 직교좌표 (x, y) , (x', y') 의 한 축이 다른 축에 대해 θ 만큼 회전하였다면 (x, y) 를 알고 있다는 가정하에서 (x', y') 는 θ 및 (x, y) 의 함수로 표현될 수 있다.

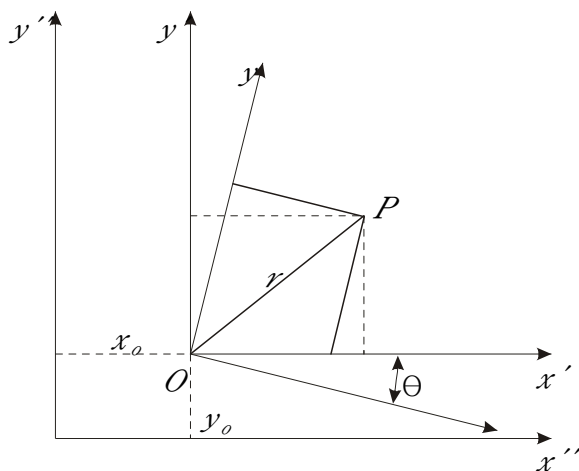


그림-2.1 2차원 등각사상변환

$x' = x \cos \theta + y \sin \theta$, $y' = x (-\sin \theta) + y \cos \theta$ 를 행렬로 표시하면 식 (2.1)이 얻어진다.

$$\begin{pmatrix} x \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \rightarrow X' = Rx \quad (2.1)$$

여기서, R 은 회전행렬이고, (x', y') 에서 (x, y) 로 변환하면 $x = x' \cos \theta - y' \sin \theta$, $y = y' \sin \theta + x' \cos \theta$ 이므로, 행렬로 표시하면 다음의 식(2.2)와 같이 된다.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

(2) 회전 및 축척변환

$X' = SRX$ (S :축척계수)이므로 식(2.2)를 대입하면 식(2.3)과 같이 된다.

$$\begin{pmatrix} x \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S \cos \theta & S \sin \theta \\ -S \sin \theta & S \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ -b & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

여기서, $a = S \cos \theta$, $b = S \sin \theta$ 이며, 식(2.3)에서 역행렬을 취하면 다음과 같은 식(2.4)가 된다.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \frac{1}{a^2 + b^2} \begin{pmatrix} a & b \\ -b & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

여기서, $a^2 + b^2 = s^2$ 이다.

(3) 회전, 축척변환 및 평행변위

(x, y) 에서 (x'', y'') 로의 변환은 회전 및 축척변환과 평행변위로 구성된

다. $x'' = ax + by + x_o$, $y'' = -bx + ay + y_o$ 를 행렬로 표시하면 다음의 식(2.5)와 같이 된다.

$$\begin{pmatrix} x'' \\ y'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ -b & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_o \\ y_o \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

위의 식은 미지수 a, b, x_o, y_o 의 4개를 갖고 있으므로 4변수변환이 된다.

2.2.2. 2차원 부등각사상변환(Affine Transformation)

Affine Transformation은 2차원 등각사상변환에 대한 축척에서 x, y 방향에 대해 축척인자가 다른 미소한 차이를 갖는 변환으로, 비록 실제 모양은 변화하지만 평행선은 Affine Transformation 후에도 평행을 유지한다.

Affine Transformation은 비직교인 기계좌표계에서 관측된 지표좌표계를 사진좌표계로 변환할 때 이용되며, 선형왜곡보정에 자주 사용된다. 등각사상변환의 회전변환식을 이용하여 축척변환 S_x, S_y 를 적용한 다음 평행변위 x_o, y_o 를 더하면 $x'' = a_1x + b_1y + x_o$, $y'' = a_2x + b_2y + y_o$ 가 된다. 이것을 행렬식으로 표현하면 식(2.6)과 같이 표시된다.

$$\begin{pmatrix} x'' \\ y'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_o \\ y_o \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

역변환에 의해 다음의 식(2.7)이 얻어진다.

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \frac{1}{a_1 b_2 - a_2 b_1} \begin{pmatrix} b_2 & -b_1 \\ -a_2 & a_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x'' - x_o \\ y'' - y_o \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

위의 식(2.7)은 미지수가 $a_1, b_1, a_2, b_2, x_o, y_o$ 로 6개가 되고, 따라서 6변수 변환이 된다.

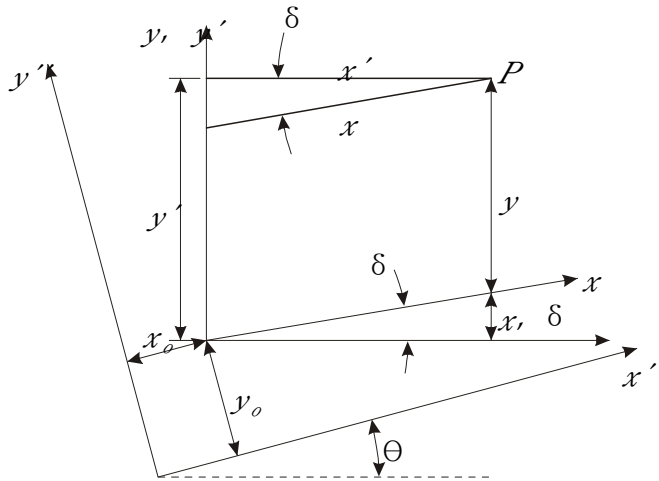


그림-2.2 Affine Transformation

2.2.3. 파랑의 처오름 및 조위보정 방법

(1) 파랑의 처오름보정

항공사진으로부터 해안선의 판독시에 물에 젖어 있는 부분과 말라 있는 부분의 명암의 차이를 보이는 선을 해안선으로 간주한다. 따라서, 항공사진으로부터 얻은 해안선은 정수면에 대한 해안선으로부터 처오름 거리만큼 육지쪽으로 올라와 있다. 그러므로, 정수면에 대한 해안선을 구하기 위해서는 항공사진에서 판독한 해안선에서 처오름 거리만큼을 빼주어야 한다.

또한, 항공사진을 해석함에 있어서 파랑의 처오름보정은 사진촬영의 당시에 파고로부터 추정되어질 수 있다. 따라서, 항공사진에 나타난 쇄파선의

위치로부터 사진촬영시의 파고를 추정하고, 이로부터 파랑에 의한 처오름 보정이 수행되어진다.

현재, 해안에서의 규칙 또는 불규칙적인 파의 처오름을 계산하기 위한 이론적인 접근은 거의 전무하며, 급경사해안에 대한 규칙파의 처오름을 계산하기 위한 접근은 Hunt(1957)방정식 형태의 실험적인 설명이 유일하다. 따라서, 본 연구에서는 파랑의 처오름보정에 있어서 Hunt(1957)의 처오름모형에 의한 방법을 이용하였다.

Hunt(1957)의 처오름모형은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{R}{H_o} = \xi \quad (2.8)$$

여기서, R 은 처오름높이이고 ξ 는 식(2.9)과 같이 정의된 Iribarren수(또는 Surf Similarity)이다.

$$\xi = \frac{\tan \theta}{\sqrt{H_o/L_o}} \quad (2.9)$$

여기서, θ 는 해빈의 전면경사이고, H_o 와 L_o 는 심해파의 파고와 파장이다.

본 연구에서는 파랑의 처오름보정을 수행함에 있어서 전술한 Hunt(1957)의 처오름모형을 이용하여 파랑의 처오름보정을 수행하는 것으로 언급하였지만, 실제로 항공사진 자료로부터 파랑의 처오름보정을 수행하는 것은 매우 어려운 문제라 생각된다.

항공사진자료에 의해 해안선 분석을 수행할 때 분석 대상지역의 해안선은 대부분 수 km 이상의 영역을 분석하게 된다. 따라서, 항공사진상에 나타난 처오름구간도 각각의 영역마다 처오름 또는 처내림의 구간으로 나타나기 때문에 항공사진상의 자료로서 이들의 구간을 결정한다는 것은 매우 어려운 문제이기 때문이다. 따라서, 처오름 및 처내림 등의 잘못된 구간설

정으로 인하여 오히려 해안선의 분석오차를 더욱 크게 발생시킬 수 있는 요인으로 작용되는 경우가 있을 것으로 판단된다. 아울러, 파랑의 처오름에 대한 크기는 상대적으로 해빈의 경사와 촬영 당시의 파고에 의해 지배되어 진다. 즉, 항공사진 촬영은 날씨가 양호한 경우에 수행되어지는 것이 대부분이기 때문에 상대적으로 항공사진 촬영당시의 파고도 대부분 미약한 것으로 나타나게 되는 것이 일반적이다. 그러나, 항공사진 촬영 당시의 파고가 상대적으로 크게 나타난 사진에서는 반드시 처오름에 대한 보정이 수행되어야 할 것이다.

(2) 조위보정 방법

항공사진상에서 나타난 해안선은 수제선이 바로 정의에 맞는 해안선이라면 문제가 없으나, 실제로 해수면은 조석현상에 따라 변동을 거듭하므로 촬영 당시 항공사진에 나타난 수제선과 실제 해안선 변형해석을 수행함에 있어서 표기해야 할 해안선의 관계를 정확하게 규명해 두어야 한다.

항공사진에 의한 조위보정 방법의 계략도는 그림-2.3에 나타내는 것과 같으며, 여기에서 평균해수면의 조차 l 을 현지의 조석표에서 산정하고, 해안선과 직각방향의 평균경사각 θ 를 구하면, 보정량 S 를 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$S = l \cdot \cot \theta \quad (2.10)$$

$$\theta = \tan^{-1}(h/d) \quad (2.11)$$

여기서, h 와 d 는 그림-2.3에서 정의되는 바와 같다.

육지의 표고는 평균해수면으로부터의 높이임에 비하여 해안선과 해저수심은 이보다 높거나 낮은 평균해면을 기준으로 정하고 있지만, 우리나라에서 적용되는 해안선 규정은 측량법에서는 수제선을, 수로업무법 수로측량업무규정에서는 약최고고조면을 해안선으로 정하고 있다. 그러나, 본 연구에서는 해안선의 변동으로 인하여 대상지역의 침식 혹은 퇴적 등으로 발생

되는 여러 가지 문제점 등을 해결하는데 주안점을 둔 해석이므로 약최고저조면을 기준으로 하여 분석을 수행하였다.

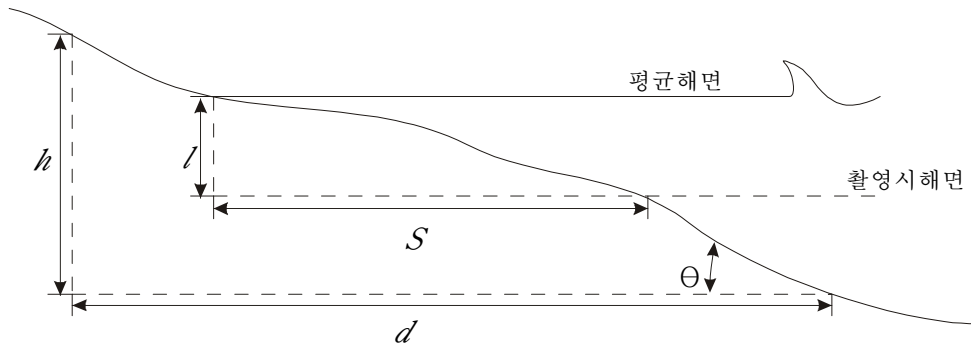


그림-2.3 조석보정

2.3 항공사진의 분석결과

년도별 해안선 분석은 사진-2.1에서 나타난 것과 같이 사빈이 존재하는 A(제1사장), B(제2사장)구간으로 나누어 수행하였으며, 해안선의 결과로 나타난 해변폭은 임의의 기준선으로부터 해안선까지의 거리를 산정한 것이다.

각 년도별 항공사진에서 독취한 해안선의 위치를 그림-2.4에 나타내었으며, 그림-2.5는 사진-2.1에서 나타난 해안의 임의단면(L1~L6)의 시간에 따른 해변폭의 변화를 나타낸 것이다. 또한, 사진-2.2~2.7은 현재까지 국립지리원으로 입수된 항공사진 자료이다. 년도별 항공사진 자료를 이용한 해안선 분석결과, 항공사진을 촬영한 시기에 따라 해변폭의 증가·감소하는 경향이 반복적으로 되풀이되어 나타나고 있으며, 가장 최근에 촬영한 항공사진(2001년 12월)에서는 L5, L6 정점에서는 해변폭이 감소하는 경향을 나타내고 있으며, L1~L4 정점에서는 해변폭이 증가하는 경향을 보이고 있다.

더불어, 송도해수욕장은 인위적으로 1992년부터 매년 약 $1,000 m^3$ 의 모래를 포설하는 소규모 양빈공(2001년 제외)이 수행되어 자연환경에 의한 해안선 변화과정의 검토가 불가능하며, 항공사진의 촬영 계절이 동일하지 않

아 계절적 요인에 의한 해안선의 변화량을 고려하기 어려운 실정이다. 따라서, 보다 면밀한 송도해수욕장의 해안선의 변화과정을 검토하기 위해서는 과거의 송도해수욕장내에 포설된 양빈사의 포설량 또는 포설시기, 하천의 수문자료 등을 포함하여 종합적으로 분석되어야 할 것이다.

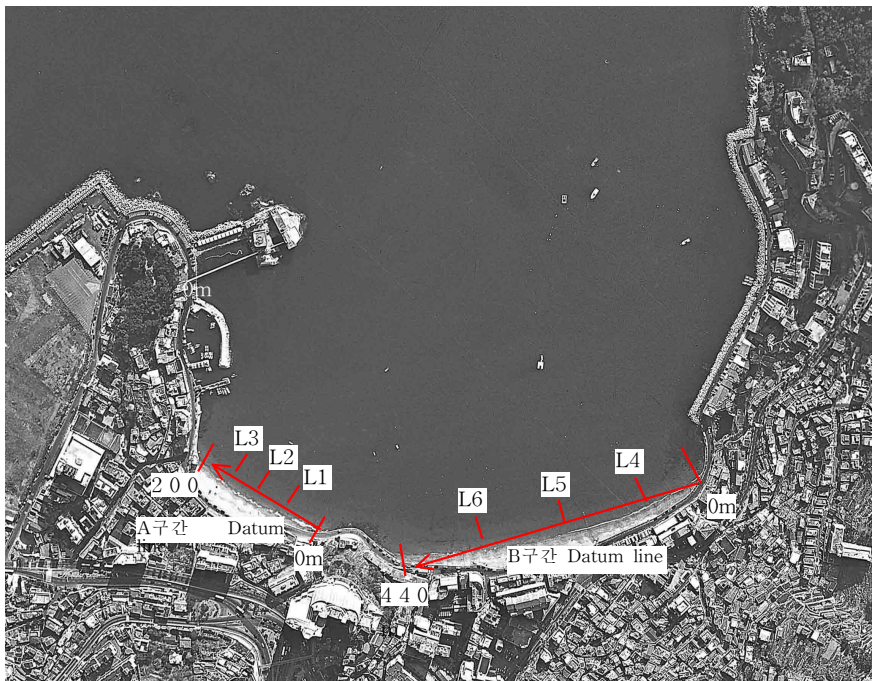


사진-2.1 항공사진 자료분석 구간

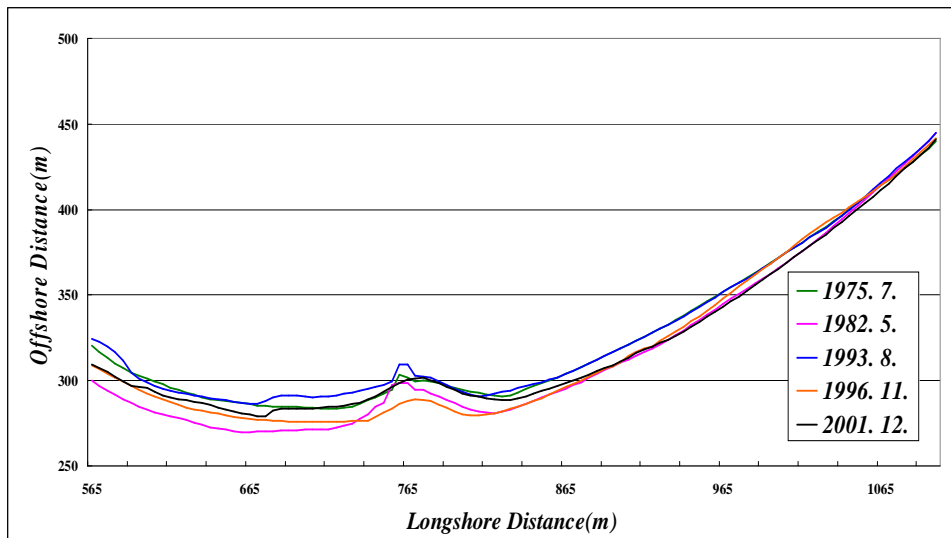


그림-2.4 항공사진에 의한 년도별 해안선의 분석결과

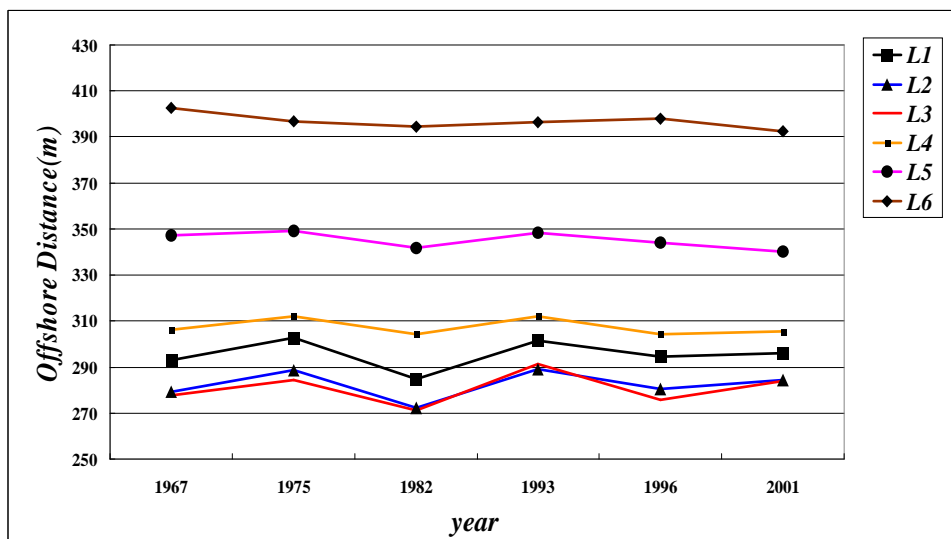


그림-2.5 단면에 따른 년도별 해빈폭의 변화

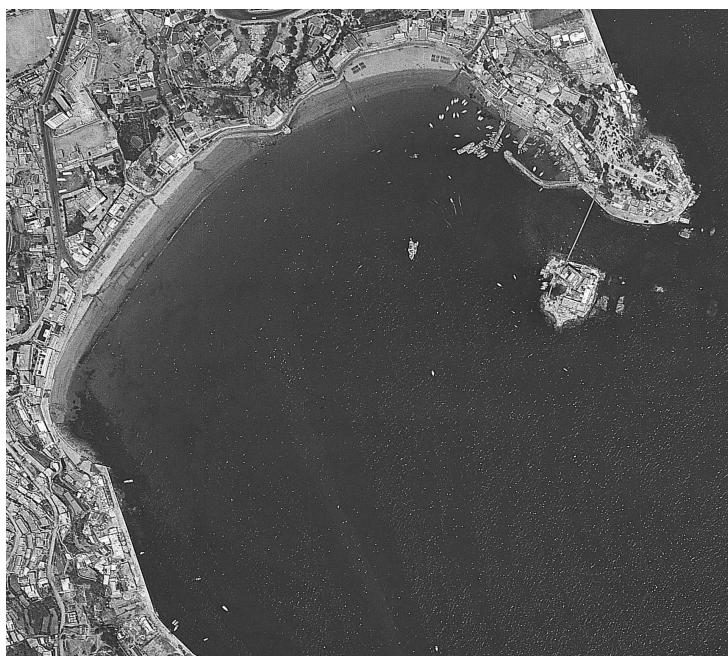


사진-2.2 1975년 7월의 항공사진 자료

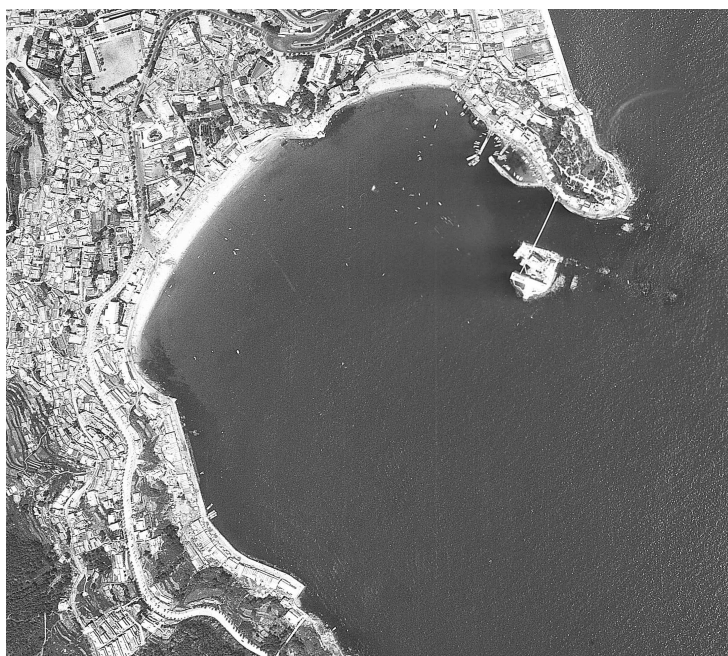


사진-2.3 1982년 5월의 항공사진 자료



사진-2.4 1987년 10월의 항공사진 자료



사진-2.5 1993년 8월의 항공사진 자료



사진-2.6 1996년 11월의 항공사진 자료



사진-2.7 2001년 12월의 항공사진 자료

제3장 수치모형실험

3.1 파랑에 의한 해빈변형 수치모형실험

3.1.1 파랑변형 수치모형실험

(1) 개요

본 파랑변형 수치모형실험은 대상해역에서 내습파랑에 의해 발생하는 해빈변형 상황을 검토하기 위하여 천해역 파랑변형 실험으로 수행하였다. 천해역 파랑변형실험은 파고계 설치지점에서 얻어진 이상파 제원으로부터 천해역의 재실험을 통하여 대상해역 해빈변형현상의 주 외력인 해빈류 수치모형실험의 입력제원을 산출하기 위해 수행하였다. 파랑변형실험의 개요를 표-3.1에 나타내었다.

(2) 실험조건

(a) 파랑

본 연구의 대상지역에서 해빈류 수치모형실험에 적용한 파랑제원의 입력치로 해양연구원에서 제시된 장기파랑산출자료(한국해양연구원, 2003)를 이용하였다. 실험에 적용된 파랑제원은 송도연안(송도해수욕장)과 가장 인접한 No.48의 심해파랑 통계산출자료중 파향별 파고계급별 출현빈도 및 주기별 파고계급별 출현빈도를 나타낸 표-3.2, 표-3.3을 이용하여 산정하였으며, 대상해역에서 이상파 내습시의 SSE계열의 파랑에 대하여 파랑변형 수치모형실험을 수행하였다. 파랑변형 수치모형실험의 파랑제원중 파고는 대상해역의 중심 13.5m지점에 설치한 파고계에서 나타난 이상파를 사용하였으며, 주기는 SSE파향에 대한 주기별 파고계급별 출현빈도로부터 파고계급에 대해 누적출현율이 95%에 해당하는 주기를 그 파고계급의 대표주기로 설정하였다.

송도해안의 파랑변형 수치모형실험에 적용된 파랑제원을 표-3.4에 정리하여 나타내고 있다.

표-3.1 파랑변형 수치모형실험의 개요

구 분		내 용		비 고
실험목적		<ul style="list-style-type: none">• 이상파랑에 대한 해빈류 상황검토• 지형변동 수치모형실험의 입력자료 산출		
사용모형		• 파랑변형실험 : 에너지평형방정식모형		유한 차분 모형
모형구성		천해역	<ul style="list-style-type: none">• 격자구성 (200×200격자)<ul style="list-style-type: none">- 송도해수욕장 전면해역 (1.0km×1.0km)- 격자간격 : 5m- 격자수 : 40,000개	
입력자료		• 파랑제원 : SSE파향 1/3 이상파 제원		
		• 수심자료: 수심측량자료(2001년, 2004년) 및 최신해도		
기준해수면		• 대상해역의 삭망평균만조위(H.W.L) : 143.0 cm		
실험안		<ul style="list-style-type: none">• 과거안(2001년 12월), 잠제설치시(2004년 6월), 잠제+돌 제설치시(2004년 12월)• 파향 : SSE 이상파		

(b) 조위 및 수심

본 수치모형실험에서 조위는 송도해수욕장의 연안정비에 따른 기본설계시에 관측된 조석자료를 사용하였으며, 조위표에 정리된 바에 의하면 평균해면은 DL(+64.9cm, 송도해수욕장 해안의 대조차 및 소조차는 각각 117.8cm, 42.2cm로 조사되었으며, 심해역 파랑변형 수치모형실험의 대상조위는 삭망평균만조위인 DL(+143.0cm로 설정되었다. 그림-3.1, 3.3 및 3.5에 파랑변형 수치모형실험에 입력된 해저지형을 나타낸 것이다.

(c) 격자구성

표-3.1에 파랑변형실험의 격자구성을 나타내었으며, 그림-3.2, 3.4 및 3.6에 천해역 파랑변형 수치모형실험에 사용된 계산격자망을 나타내었다.

(d) 실험안

해빈변형 검토를 위한 천해역 파랑변형 수치모형실험에서는 해안침식 방지시설 설치이전의 상황(2001년 12월)과 잠제 설치시(2004년 6월), 잠제+돌제 설치시(2004년 12월)의 상황에 대한 해빈변형상황을 검토하고자 하였다. 해빈변형 실험에 적용된 실험안을 표-3.5에 정리하였다.

표-3.2 파향별 파고계급별 출현빈도

(단위 : 파랑자료수, 격자번호 : 3836)

파고(m) 파향	0~0.5	0.5~1	1~2	2~3	3~5	5~	Total	빈도(%)
N	444	527	302	24	7	0	1304	2.2
NNE	1417	3695	3583	588	128	2	9413	16.1
NE	1423	3806	4301	1384	550	20	11484	19.7
ENE	580	1398	1852	443	103	1	4377	7.5
E	160	388	293	37	3	0	881	1.5
ESE	106	228	154	18	5	0	511	0.9
SE	124	243	186	18	1	0	572	1.0
SSE	171	331	288	39	6	0	835	1.4
S	943	1408	833	115	26	0	3325	5.7
SSW	1433	4378	4307	789	117	4	11028	18.9
SW	913	2179	1961	237	33	1	5324	9.1
WSW	739	1354	865	45	2	0	3005	5.1
W	764	392	77	0	0	0	1233	2.1
WNW	1071	1173	55	2	0	0	2301	3.9
NW	916	956	51	1	0	0	1924	3.3
NNW	534	339	46	4	0	0	923	1.6
Total	11738	22795	19154	3744	981	28	58440	100.0

표-3.3 주기별 파고계급별 출현빈도

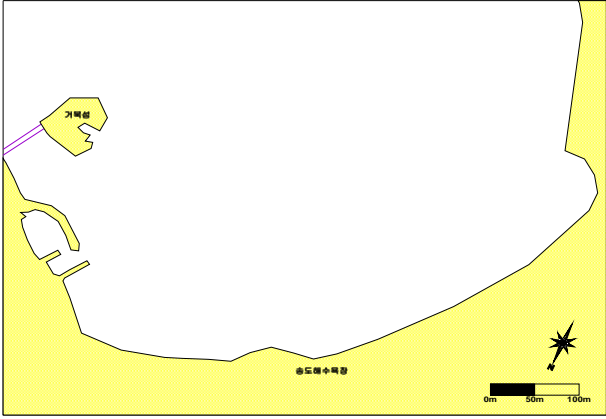
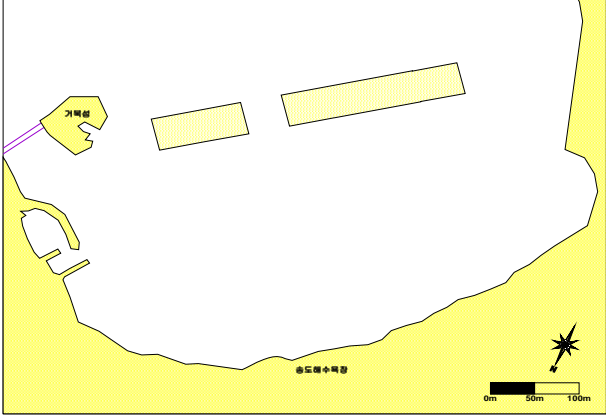
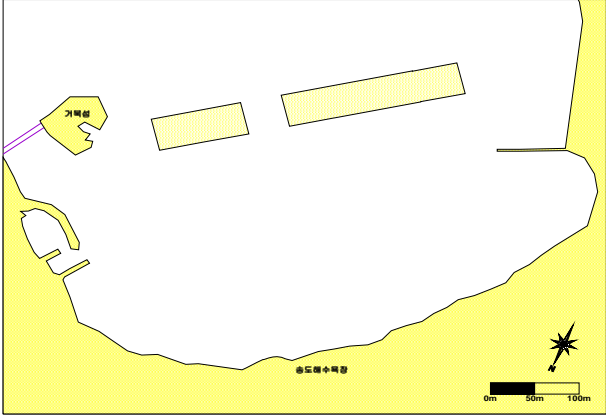
(단위 : 파랑자료수, 격자번호 : 3836)

주기(s) 파고(m)	~4	4~5	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10	10~11	11~12	12~	Total	빈도(%)
0.0~0.5	6580	1557	1402	1097	549	217	168	110	31	27	11738	20.1
0.5~1.0	7752	3001	4536	3708	1944	627	822	256	79	70	22795	39.0
1.0~1.5	614	2893	1912	3351	2675	452	745	271	83	65	13061	22.3
1.5~2.0	8	270	1886	1082	1817	264	582	104	45	35	6093	10.4
2.0~2.5	0	15	176	898	721	140	467	70	30	39	2556	4.4
2.5~3.0	0	0	19	189	432	96	333	73	22	24	1188	2.0
3.0~3.5	0	0	0	20	191	148	143	45	14	8	569	1.0
3.5~4.0	0	0	0	7	25	119	70	22	16	5	264	0.5
4.0~4.5	0	0	0	0	2	28	42	16	7	8	103	0.2
4.5~5.0	0	0	0	0	0	2	31	12	0	0	45	0.1
5.0~	0	0	0	0	0	0	6	21	1	0	28	0.0
Total	14954	7736	9931	10352	8356	2093	3409	1000	328	281	58440	
빈도(%)	25.6	13.2	17.0	17.7	14.3	3.6	5.8	1.7	0.6	0.5		

표-3.4 심해역 파랑변형 수치모형실험의 적용 파랑제원

파향	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	비고
SSE	3.02	11.1	파고계 관측자료 중에서 최대유의파 조건 ($H_{1/3}=2.99\text{m}$, $T_{1/3}=11.1\text{sec}$)의 입사파로 환산하여 산출

표-3.5 해빈변형실험에 적용된 실험안

실험안	평면배치	비고
과거안		2001년 12월
잠제 설치시		2004년 6월
잠제+돌제 설치시		2004년 12월

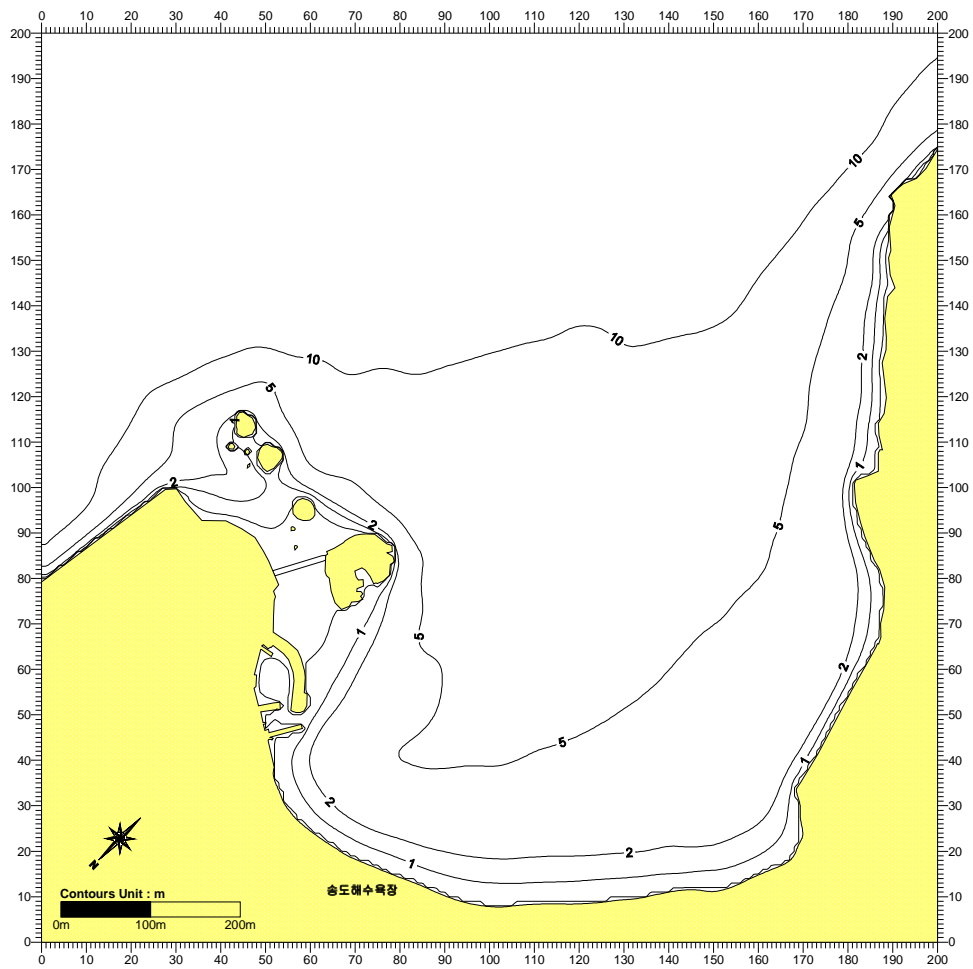


그림-3.1 등수심선도 (천해역, 과거안, SSE)

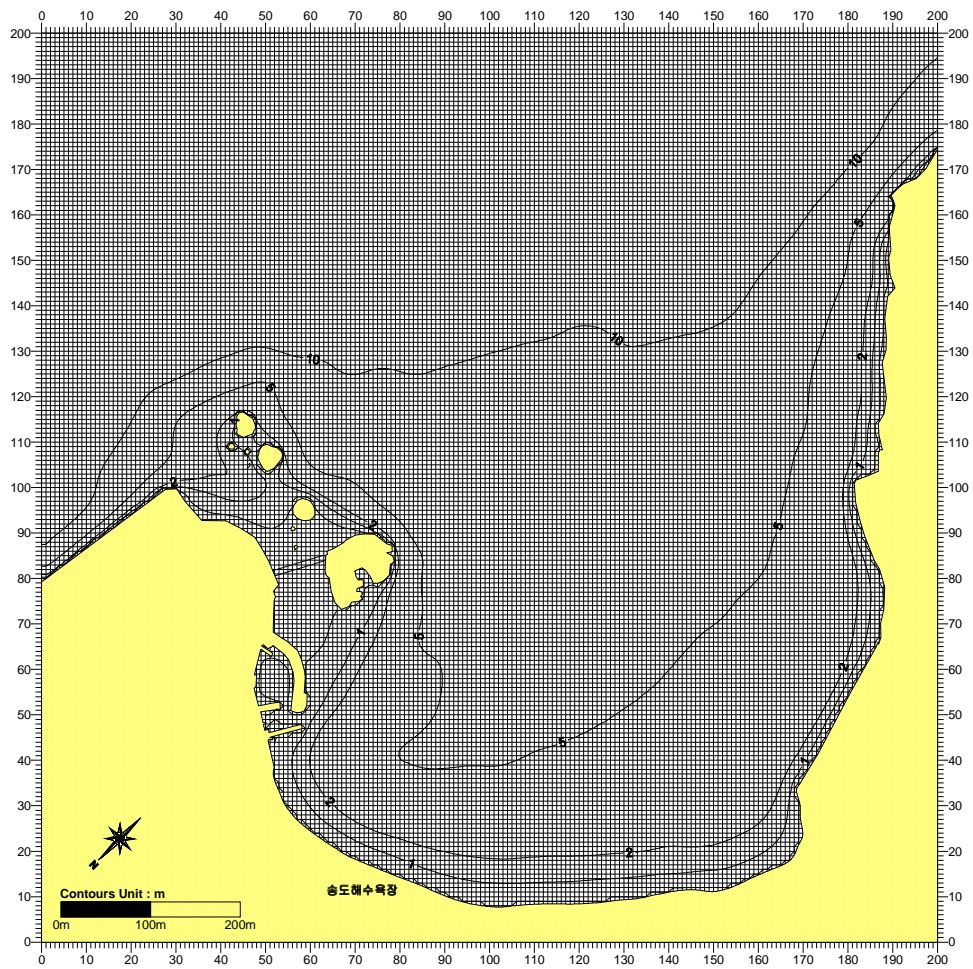


그림-3.2 계산격자망도 (천해역, 과거안, SSE)

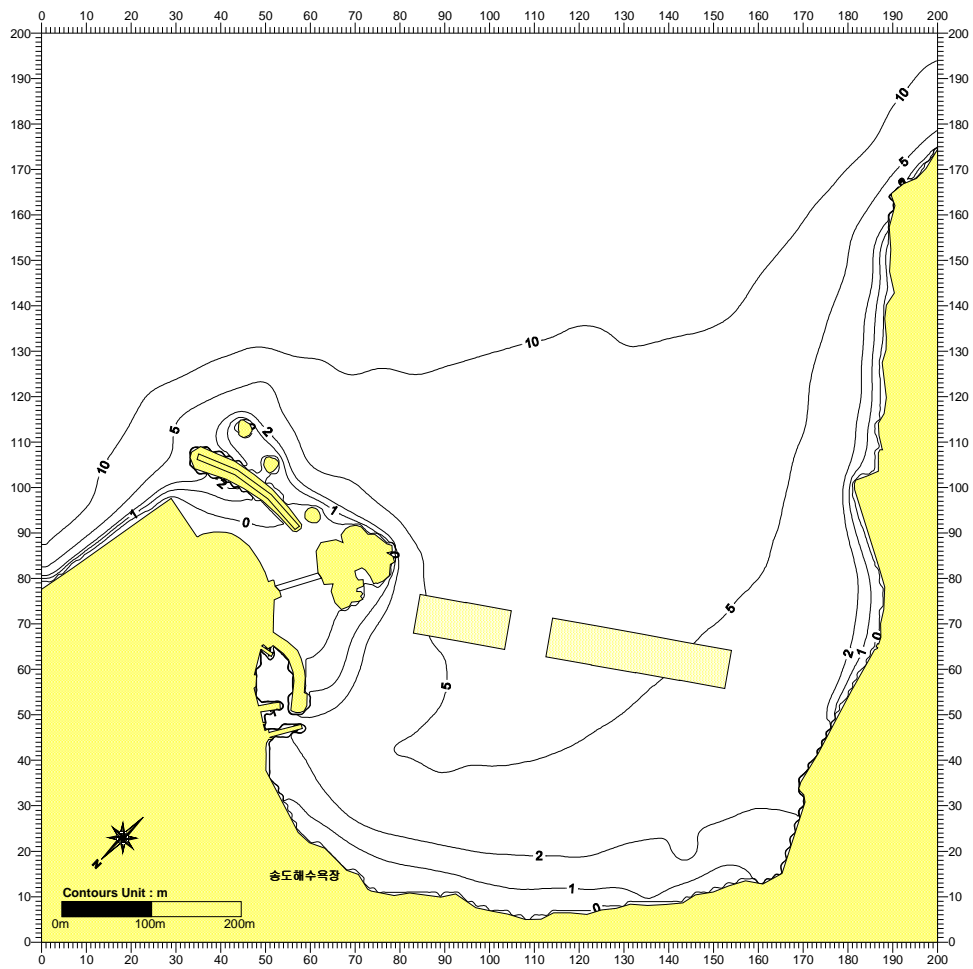


그림-3.3 등수심선도 (천해역, 잠제설치시, SSE)

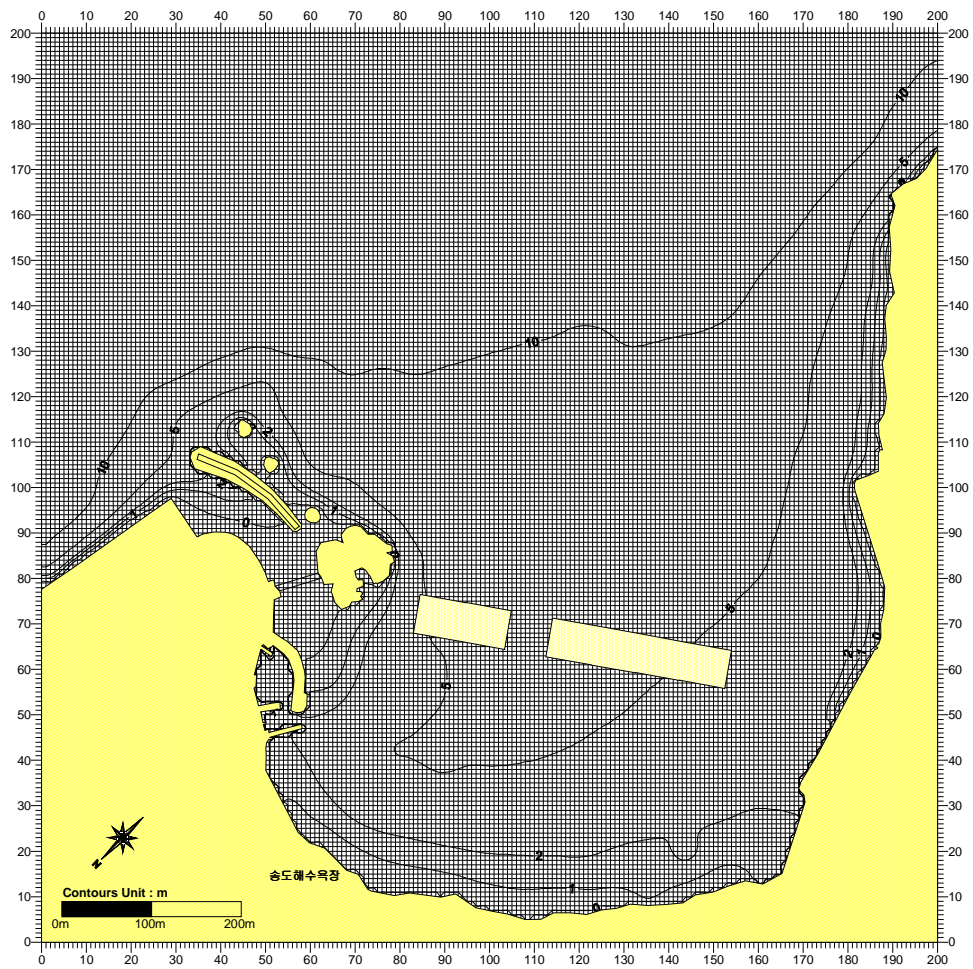


그림-3.4 계산격자망도 (천해역, 잠제설치시, SSE)

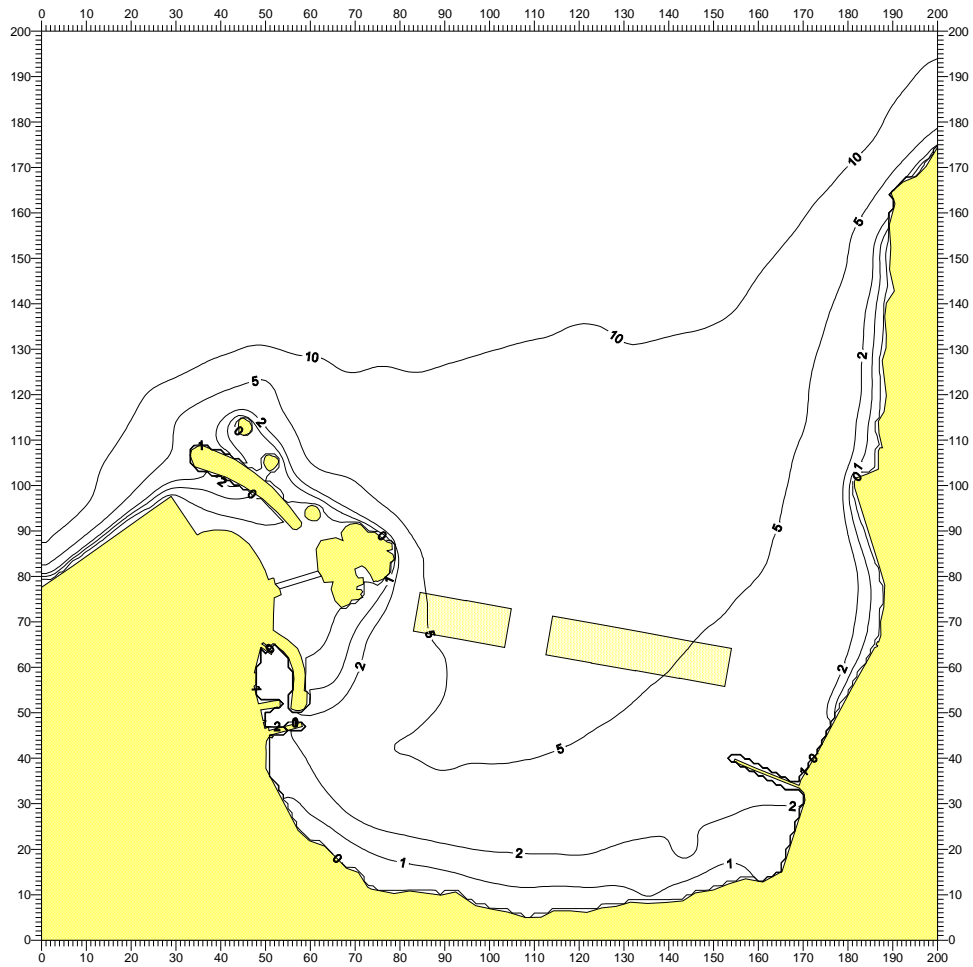


그림-3.5 등수심선도 (천해역, 잠제+돌제설치시, SSE)

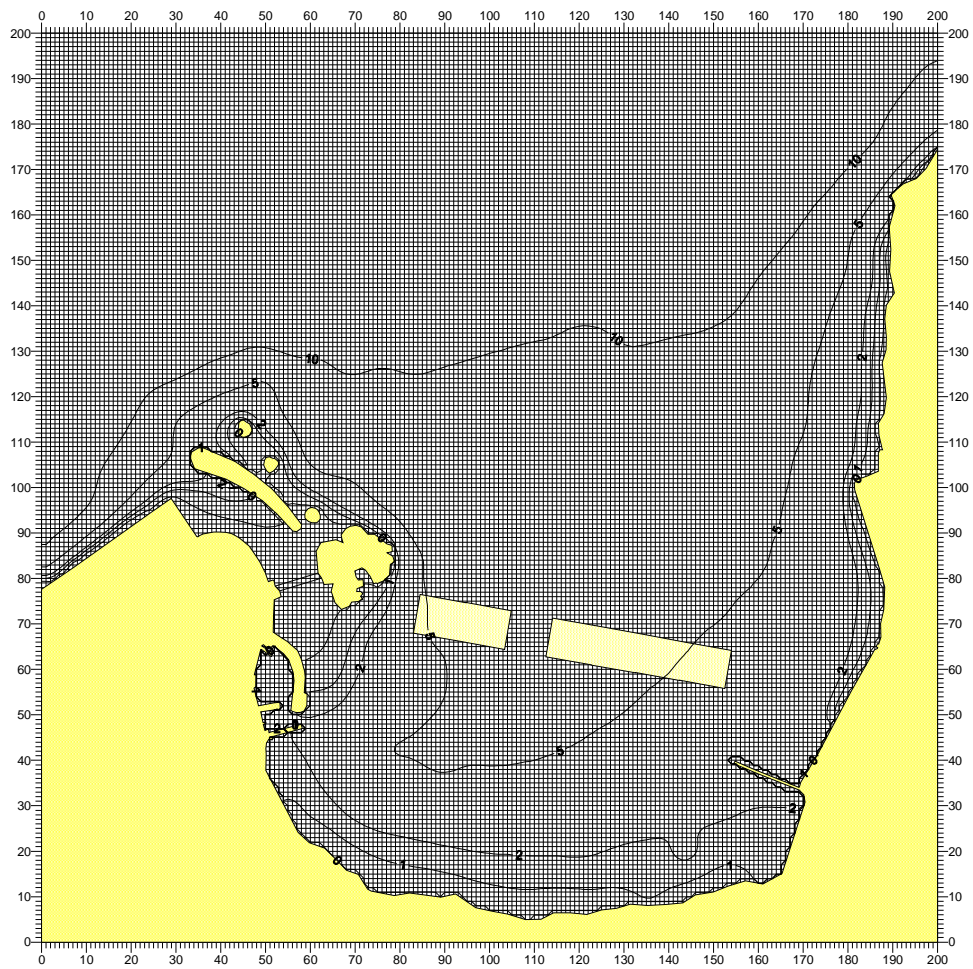


그림-3.6 계산격자망도 (천해역, 잠제+돌제설치시, SSE)

(3) 사용모형

본 연구의 천해역 파랑변형 수치모형실험에는 Karlsson에 의해 제안된 에너지평형방정식(Karlsson, 1969)을 기본방정식으로 하는 에너지평형방정식 모형을 사용하였다. 이 모형의 특징은 다방향불규칙파를 수치상으로 재현할 수 있다는 점이다. 이 방법은 각 성분파의 에너지스펙트럼이 시간적·공간적으로 보존된다고 가정하고, 수심변화에 따른 천수변형, 굴절, 쇄파 등의 제현상을 고려하여 심해로부터 천해로의 파고변화를 순차적으로 계산해 나가는 방법이다.

방향스펙트럼을 E , 외부에너지의 수치를 Q , 에너지 전파속도벡터를 \vec{V} 라 하면 에너지평형방정식은 식(3.1)과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot (E\vec{V}) - Q = 0 \quad (3.1)$$

여기서,

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial f}, \frac{\partial}{\partial \theta} \right)$$

$$\vec{V} = \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_f \\ V_\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_g \cos \theta \\ C_g \sin \theta \\ \frac{\partial f}{\partial t} \\ \frac{C_g}{C} \left(\frac{\partial C}{\partial x} \sin \theta - \frac{\partial C}{\partial y} \cos \theta \right) \end{pmatrix}$$

$$C_g = \frac{C}{2} \left\{ 1 + \frac{2kh}{s2kh} \right\}$$

여기서, C_g 는 군속도, C 는 파속, k 는 파수, h 는 수심, f 는 주파수, θ 는 파향이다. 그리고, 다음과 같은 가정을 사용한다.

- ① 파랑의 상태는 시간적으로 변화하지 않음
- ② 성분파의 주기는 변화하지 않음
- ③ 외부에너지의 수지는 없음

또한, $\partial E / \partial t = Q = \partial f / \partial t = 0$ 이 성립한다. 따라서, 식(3.1)의 에너지평형 방정식을 정리하면 식(3.2)와 같이 된다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(EV_x) + \frac{\partial}{\partial y}(EV_y) + \frac{\partial}{\partial \theta}(EV_\theta) = 0 \quad (3.2)$$

결국, 식(3.2)를 E 에 대해서 풀면 한 점에서의 파랑의 상태를 알 수 있다. 그러나, 일반적으로 식(3.2)를 해석적으로 푸는 것은 곤란하기 때문에 각 항을 차별화하여 E 에 관한 연립방정식을 세우고 경계조건을 설정함으로써 결과를 얻을 수 있다.

우선, 계산영역내의 심해측에서는 그 지점의 방향스펙트럼을 심해파의 방향스펙트럼인 E 와 대등하다는 조건을 부여하고, 이 지점으로부터 계산을 개시하여 해안쪽으로 진행하여 간다. 이와 같은 심해측 경계조건을 부여한 후에 측방 경계조건을 부여할 경우에는 해역측과 육지측을 분리하여, 우선 해역측에서는 내외의 스펙트럼을 동일한 것으로 간주하고, 육지측에서의 파랑에너지는 육지측에 부여되지 않는 것으로 한다.

불규칙파의 스펙트럼형은 주파수스펙트럼으로서 식(3.3)의 Bretschneider-Mitsuyasu형을 이용할 수 있으며, 방향분포함수로서는 식(3.4)의 Mitsuyasu형을 이용할 수 있다.

$$E(f, \theta) = E(f) \cdot G(f, \theta) \quad (3.3a)$$

$$E(f) = 0.257 H_{1/3}^2 T_{1/3} (T_{1/3} f)^{-5} \exp[-1.03 (T_{1/3} f)^{-4}] \quad (3.3b)$$

$$G(f, \theta) = G_\theta \cos^{2S}(\theta/2) \quad (3.4)$$

여기서,

$$G_\theta = \left[\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \cos^{2S}(\theta/2) d\theta \right]^{-1}$$

$$S = \begin{cases} S_m (f/f_p)^5 & f \leq f_p \\ S_m (f/f_p)^{-2.5} & f > f_p \end{cases}$$

$$f_p = 1/(1.05 T_{1/3})$$

여기서, $E(f)$ 는 스펙트럼밀도함수, $G(f, \theta)$ 는 방향분포함수, S 는 방향에 대한 에너지의 집중도를 나타내는 파라미터, S_{\max} 는 방향집중도 파라미터, f_p 는 주파수스펙트럼의 피크치에 해당하는 주파수이다.

또한, 해빈류 계산에 사용하는 경우에는 주파수스펙트럼의 영향은 작은 것으로 간주하여 단일주파수를 부여한다. 쇄파영역의 규정에 있어서 쇄파에 대해서는 식(3.5)에 나타낸 Goda(合田, 1975)의 쇄파관계식을 이용한다.

$$H_b/L_0 = A \left\{ 1 - \exp \left[-1.5 \frac{\pi h_b}{L_0} (1 + K \tan^{4/3} \beta) \right] \right\} \quad (3.5)$$

여기서, $A = 0.12 \sim 0.16$, $K = 15$, H_b 는 쇄파파고, h_b 는 쇄파수심,

$\tan\beta$ 는 해저경사이다.

(4) 실험결과

전술한 실험조건을 이용하여 해빈변형 검토를 위한 천해역의 파랑변형 수치모형실험을 수행하였으며, 천해역의 파랑변형 수치모형실험 산출결과는 해빈류 수치모형실험의 입력제원으로 이용된다. 천해역의 파랑변형 수치모형실험의 산출결과는 그림-3.7~3.12에 등파고선도와 파향백타도로서 도시하였다.

천해역 파랑변형 수치모형실험결과를 살펴보면 SSE파향의 경우에 입사한 파랑이 섬 등의 차폐물에 차단되지 않기 때문에 파고감쇠효과가 작게 나타났으며, 이 때 송도해수욕장 입구부에서의 파고는 1.07m~1.19m로 나타나고 있다. 잠제설치시와 잠제+돌제설치시의 파랑변형 수치모형실험결과에 따르면 잠제에 의해 SSE파향에서 잠제 전면의 파고가 1.0m에서 잠제의 파고감쇠효과로 인해 잠제 후면의 파고가 0.5m로 약 50%의 파고감쇠율이 나타났다. 돌제 배후면에서의 파고감쇠는 0.1m~0.2m로 나타났으며, 돌제 배후면에서 해안측으로 165m정도 떨어진 구간까지 파고감쇠효과가 나타났다.

표-3.6 천해역 파랑변형실험에 적용된 도달파고 및 파향

실험안	파향	산출도달파고(m)	산출도달파향
<ul style="list-style-type: none"> · 과거안 (2001년 12월) · 잠제설치시 (2004년 6월) · 잠제+돌제설치시 (2004년 12월) 	SSE	3.02	S69.0E

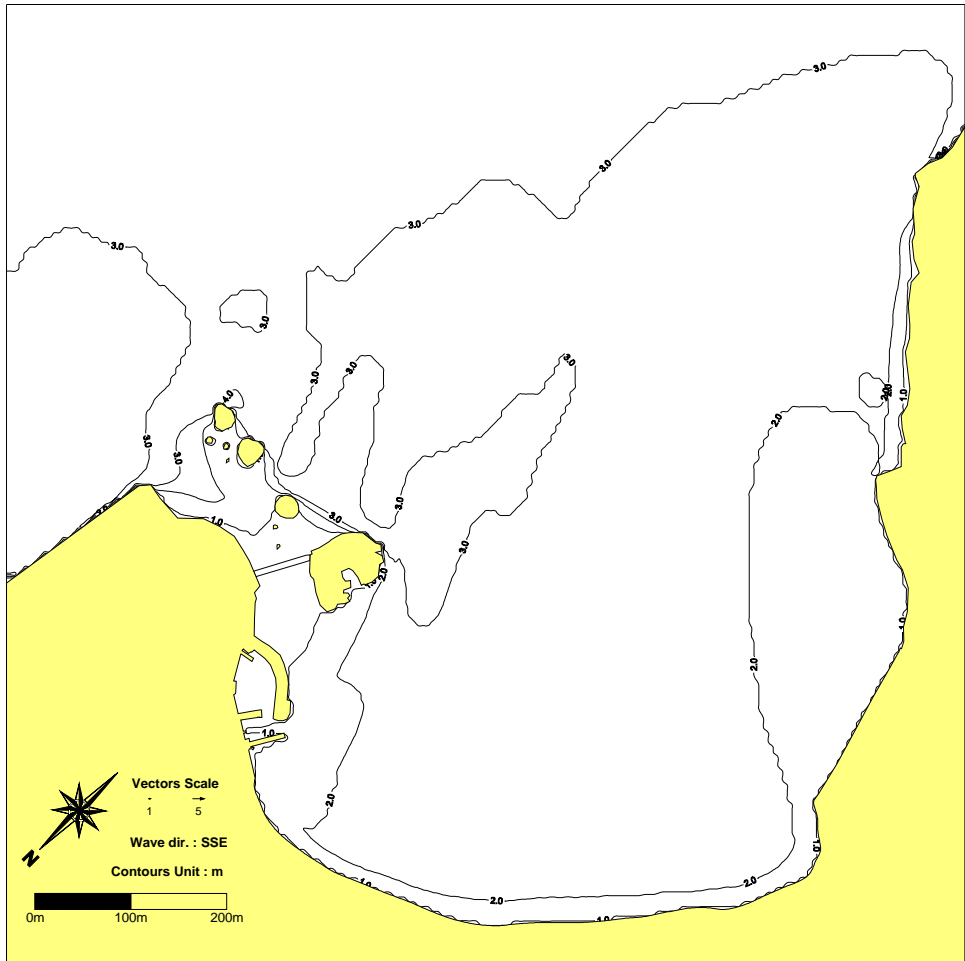


그림-3.7 등파고선도 (천해역, 과거안, SSE, $H_{1/3(0)}=3.02\text{m}$, $T_{1/3(0)}=11.1\text{s}$)

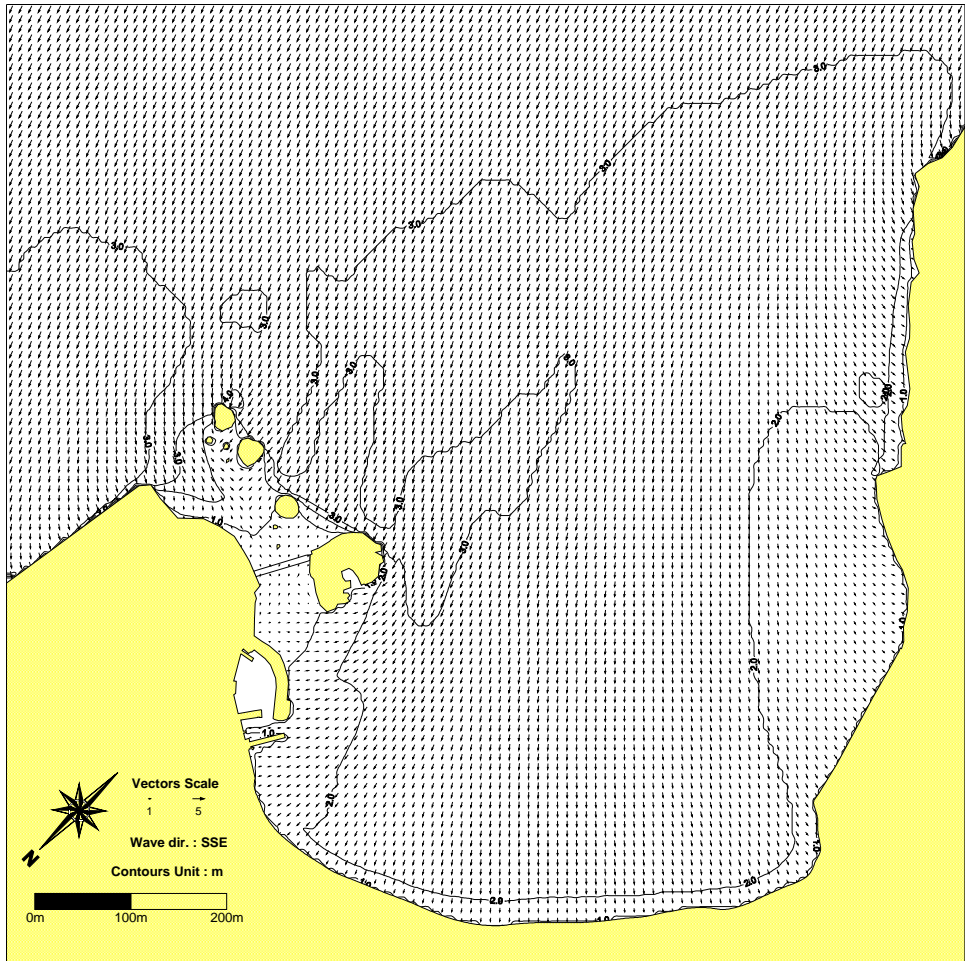


그림-3.8 파향벡타도 (천해역, 과거안, SSE, $H_{1/3(0)}=3.02\text{m}$, $T_{1/3(0)}=11.1\text{s}$)



그림-3.9 등파고선도 (천해역, 잠제설치시, SSE, $H_{1/3(0)}=3.02\text{m}$,

$$T_{1/3(0)}=11.1\text{s})$$

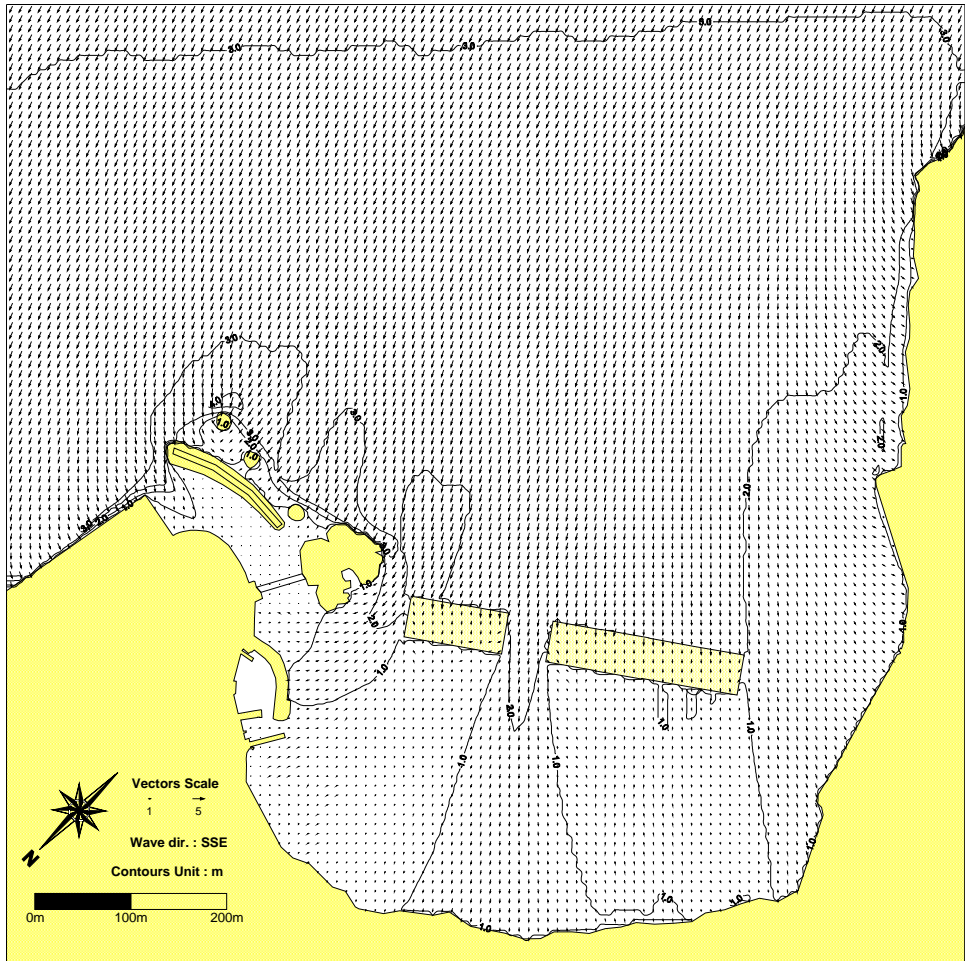


그림-3.10 파향벡터도 (천해역, 잠제설치시, SSE, $H_{1/3(0)}=3.02\text{m}$,

$$T_{1/3(0)}=11.1\text{s})$$

3.1.2 해빈류 수치모형실험

(1) 개요

서해안과 같이 조석현상이 탁월한 경우에 해저물질의 이동은 조류의 영향이 거의 대부분을 차지하고 있다. 반면에, 본 연구에서 검토하고 있는 부산해역은 대조승이 약 1.18m로 서해안 및 남해안의 서부에 비해 조차가 적은 지역에 해당하므로 조류로 인한 해저물질의 이동은 파랑에 의한 흐름 즉, 해빈류가 해저물질의 이동에 끼치는 영향에 비해 다소 미약하다고 할 수 있다. 따라서, 송도해수욕장 해안의 해빈변형현상은 조류보다는 파랑에 의해 수반되는 해빈류 흐름이 해저물질 이동의 기본외력이 될 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 현상태에 대한 해빈류 수치모형실험을 수행하여 해저물질의 이동과 그에 따른 해저지형의 변화에 밀접한 관계가 있는 해빈류 유동상황을 재현한 후, 대상해역에서 해안침식 방지시설의 설치 전·후의 해빈류 흐름특성을 파악하였다. 해빈류 수치모형실험의 개요는 표-3.7과 같다.

(2) 실험조건

해빈류 수치모형실험에는 파랑장 계산결과가 주외력의 입력제원으로 이용되기 때문에 천해역 파랑변형 수치모형실험과 동일한 실험조건과 실험안에 대하여 수치실험을 수행한다. 따라서, 파랑제원, 조위조건, 수심입력, 격자구성, 실험안 등의 실험조건 대해서는 3.1.1절의 파랑변형 수치모형실험에서 실험조건과 동일하다.

(3) 사용모형

해빈변형 예측을 위한 수치모형은 Watanabe · Maruyama (1984)에 의해 개발된 3차원 해빈변형 수치모형이며, 이 모형은 그림-3.13에서와 같이 크게 나누어 파랑장의 계산, 해빈류장의 계산, 지형변화의 계산의 3개의 서브모형에 의해 구성된다.

표-3.7 해빈류 수치모형실험의 개요

구 분	내 용	비 고
실험목적	• 대상 해역의 파랑 내습시 해빈류 상황 검토	
사용모형	• 해빈류 실험 : 2차원 천수방정식 모형(WIC-3D)	유한 차분 모형
모형구성	<ul style="list-style-type: none"> • 격자구성 (200×200격자) - 송도해수욕장 전면해역 (1.0km×1.0km) - 격자간격 : 5m - 격자수 : 40,000개 	
입력자료	• 파랑변형실험에서 산출된 파랑장 산출결과	
	• 수심자료: 수심측량자료(2001년, 2004년) 및 최신해도	
기준해수면	• 대상해역의 삭망평균만조위(H.W.L) : 143.0 cm	
실험안	<ul style="list-style-type: none"> • 과거안(2001년 12월), 잠제설치시(2004년 6월), 잠제+돌제설치시(2004년 12월) • 파향 : SSE 	

파랑장 계산모형은 3.1.1절의 파랑변형 수치모형실험의 사용모형에서 언급된 에너지평형방정식을 사용하였다. 본 절에서는 해빈류 계산모형에 대해서만 언급하며, 지형변동 계산모형에 대해서는 3.1.3절의 지형변동 수치모형실험 부분에서 따로 설명하도록 한다.

본 연구에서 사용된 해빈류 모형은 평면단층 2차원방정식을 기본으로 구성된 모형이다. 해빈류에 관한 기본방정식을 x, y 방향으로 나타내면, 연속방정식(3.6)과 운동방정식(3.7)과 같이 표현될 수 있으며, 이 식은 단층 2차원천수방정식에 외력으로서 파랑에 의해 야기되는 잉여 Flux항(Radiation Stress항)이 추가된 형태를 취하고 있다..

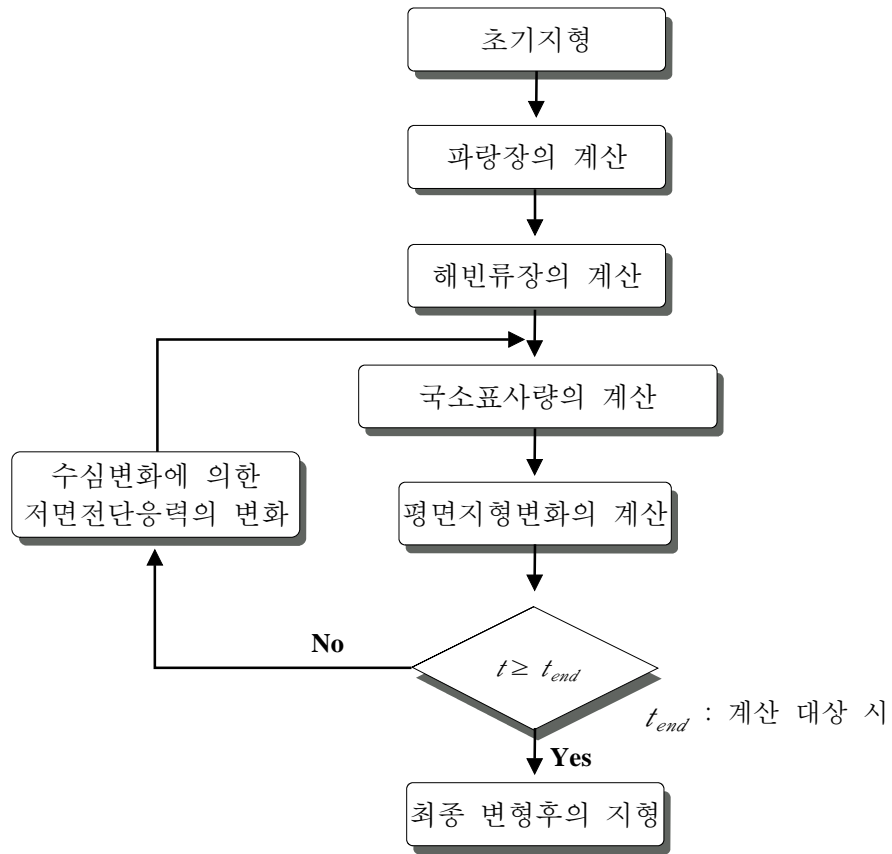


그림-3.13 해빈변형 수치모형실험의 흐름도

연속방정식

$$\frac{\partial \bar{\eta}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (h + \bar{\eta}) U + \frac{\partial}{\partial y} (h + \bar{\eta}) V = 0 \quad (3.6)$$

운동방정식

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial x} + F_x - M_x + R_x = 0 \quad (3.7a)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial \bar{\eta}}{\partial y} + F_y - M_y + R_y = 0 \quad (3.7b)$$

여기서,

$$S_{xx} = E \left[\left(2n - \frac{1}{2} \right) \cos^2 \beta + \left(n - \frac{1}{2} \right) \sin^2 \beta \right]$$

$$S_{xy} = \frac{E}{2} n \sin 2\beta$$

$$S_{yy} = E \left[\left(2n - \frac{1}{2} \right) \sin^2 \beta + \left(n - \frac{1}{2} \right) \cos^2 \beta \right]$$

$$R_x = \frac{1}{\rho(h + \bar{\eta})} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right)$$

$$M_x = \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial U}{\partial y} \right)$$

$$F_x = \frac{1}{\rho(h + \bar{\eta})} \bar{\tau}_x^B$$

$$R_y = \frac{1}{\rho(h + \bar{\eta})} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right)$$

$$M_y = \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon \frac{\partial V}{\partial y} \right)$$

$$F_y = \frac{1}{\rho(h + \bar{\eta})} \bar{\tau}_y^B$$

그리고, U, V 는 x, y 방향의 평균유속, $\bar{\eta}$ 는 평균수위, $\bar{\tau}_x^B, \bar{\tau}_y^B$ 는 x, y 방향의 해저마찰력, ϵ 은 와동점성계수, $E = \rho g H^2 / 8$, β 는 파의 입사각, $n = (1/2)(1 + 2kh / \sinh 2kh)$ 이다.

기본방정식(3.6)과 (3.7)을 차분화하기 위하여 계산 대상영역 전체를 정방격자의 미소영역으로 분할하고, 각 격자점에서 수심(h), 평균수위($\bar{\eta}$), 잉여응력(S_{ij})의 값을 정의한다. 또한, 평균유속 U 와 V 는 Staggered 격자를 사용하여 각 격자의 중앙에서 격자간격의 절반만큼 떨어진 점에서 정의한다.

x, y 방향의 차분간격을 각각 $\Delta x, \Delta y$ 라 하고, 차분간격을 동일하게 취하여 $\Delta x = \Delta y = \Delta s$ 로 하며, 시간차분간격 Δt 를 반으로 나누어 전반의 시간단계 $k\Delta t$ 로부터 $(k + 1/2)\Delta t$ 사이에서는 U 와 $\bar{\eta}$ 에 대하여 음해법, V 에 대해서는 양해법을 사용하였다.

(4) 실험결과

전술한 실험조건을 이용하여 해빈류 수치모형실험을 수행하였으며, 각 실험안에 대한 산출결과를 그림-3.14~3.16에 해빈류 유동상황으로 도시하였다.

(a) 과거안

송도해수욕장 해역의 과거안에 대한 해빈류 수치모형실험결과를 그림-3.14에 나타내었다. 거북섬과 기존어항 사이의 수역에서도 북서방향의 연안류가 탁월하게 형성되고 있으며, 송도해수욕장 전면해역에서는 비교적

약한 Vortex흐름이 국소적으로 나타나고 있다. 특히, 송도해안 서측해역에서는 국부적으로 발생하는 Vortex흐름이 합류되어 이안류를 형성하고 있으며, 동측해안에서는 해안측으로 발생한 흐름이 해안을 따라 동측과 서측으로 나뉘고 있는 것으로 볼 때 송도해역에서 해빈류 흐름이 탁월함을 알 수 있다.

(b) 잠제설치시

송도해수욕장 해역의 잠제설치시에 대한 해빈류의 수치모형실험결과를 그림-3.15에 나타내었다. 과거 송도해수욕장에 발생되던 국소적 Vortex현상과 그로 인하여 발생하는 이안류 현상은 잠제설치후 서측해역으로 빠져나가는 흐름으로 바뀌어 전면해역에 나타나는 해빈류가 매우 미약해진 것으로 나타났다. 또한, 잠제의 설치로 인해 잠제 전면부에서 쇄파가 나타났고, 흐름은 외해에서 잠제 중앙부로 들어오는 흐름과 끝단에서 Vortex현상이 생기면서 서측해역으로 빠져나가는 흐름이 발생한다. 그리고, 잠제를 통해 내해에서 외해로 빠져나가는 흐름이 발생함을 볼 수 있다. 따라서, 송도연안에 축조된 잠제는 파고감쇠 측면에서 송도연안의 침식방지에 크게 기여할 것으로 추측된다.

(c) 잠제+돌제설치시

송도해수욕장 해역의 돌제설치시에 대한 해빈류의 수치모형실험결과를 그림-3.16에 나타내었다. 돌제설치후 잠제설치 이전과 흐름의 변화는 크지 않지만 돌제로 인한 파랑감쇠효과 때문에 송도해안 서측해역으로 흐르던 미소한 흐름들이 현저히 사라지고 서측해안으로 돌아가는 흐름 때문에 송도연안 정비사업에서 계획된 양빈사 유실을 저감시킬 수 있을 것이다.

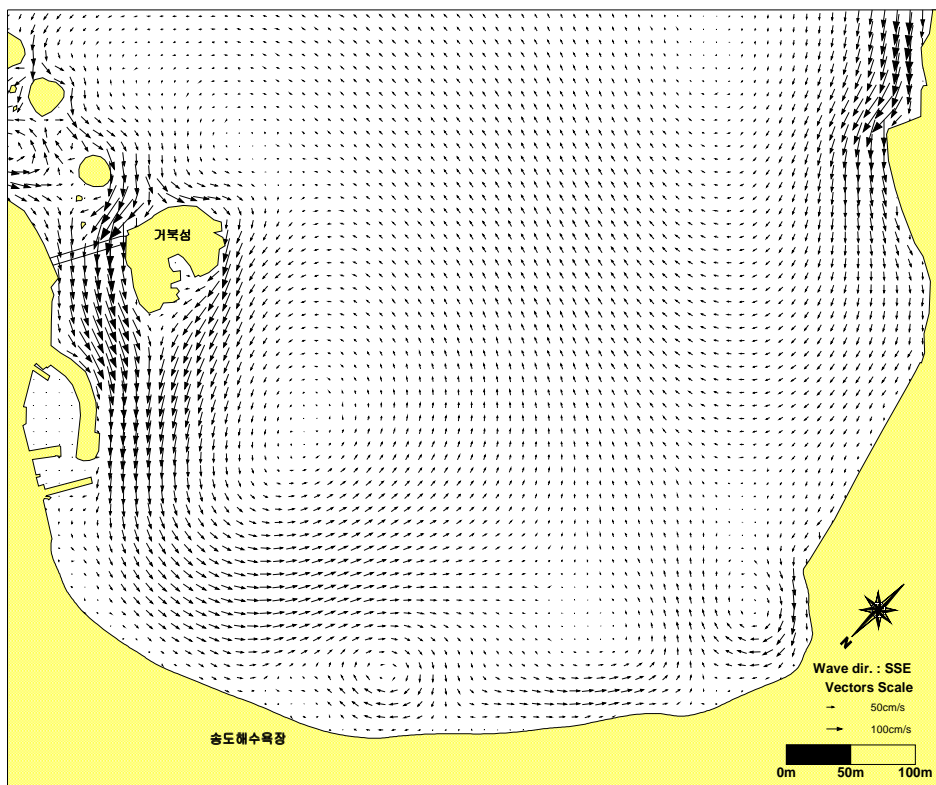


그림-3.14 해빈류 유동상황 (과거안, SSE, $H_{1/3(0)}=3.02\text{m}$, $T_{1/3(0)}=11.1\text{s}$)

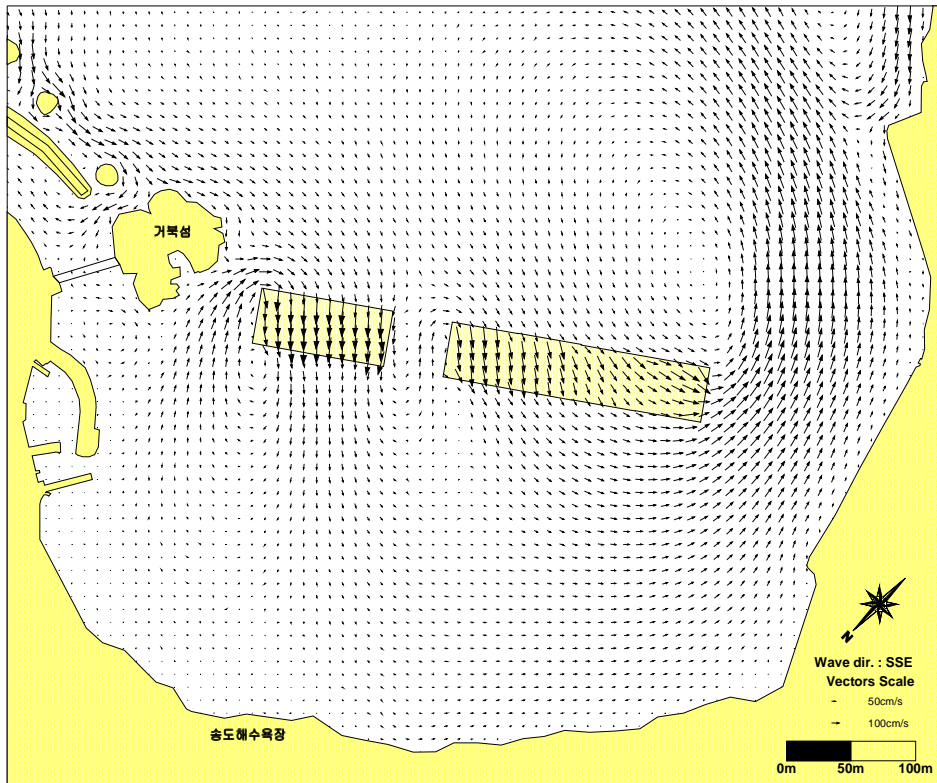


그림-3.15 해빈류 유동상황 (잠제설치시, SSE, $H_{1/3(0)}=3.02\text{m}$, $T_{1/3(0)}=11.1\text{s}$)

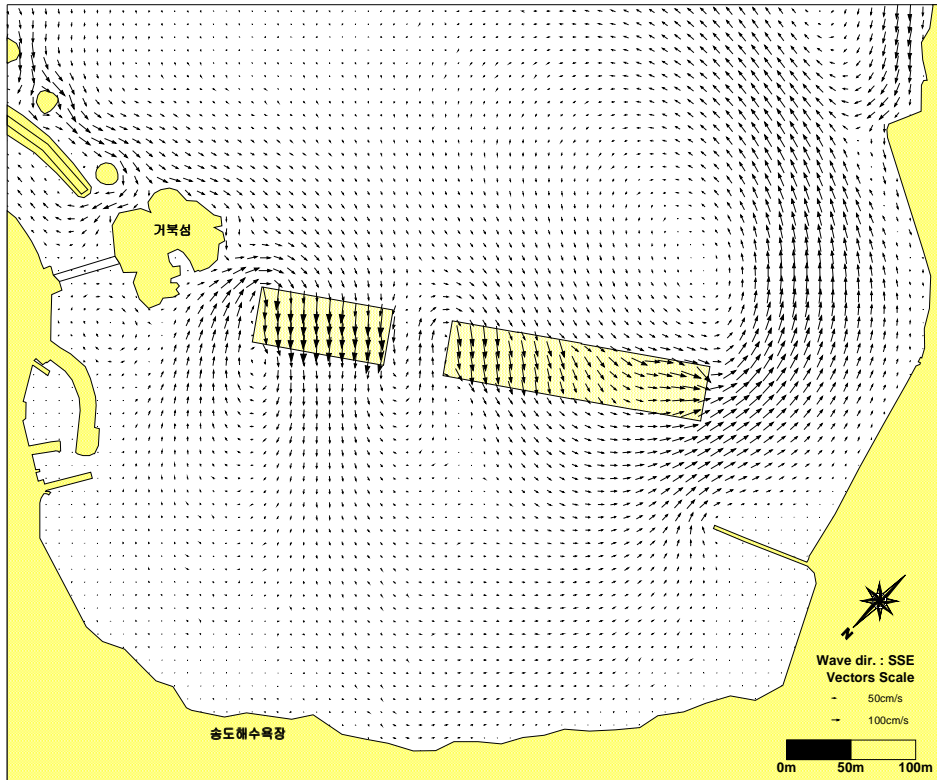


그림-3.16 해빈류 유동상황 (잠제+돌제설치시, SSE, $H_{1/3(0)}=3.02\text{m}$,
 $T_{1/3(0)}=11.1\text{s}$)

3.1.3 지형변동 수치모형실험

(1) 개요

본 실험은 송도연안정비사업 실시 전·후의 해빈변형 상황을 검토하여 잠제, 돌제 등의 해안침식 방지공법의 영향을 파악하고자 하였다. 본 지형변동 수치모형실험은 3.1.1절과 3.1.2절에서 검토된 파랑장 및 해빈류장의 실험결과를 입력자료로 하여 지형변동 수치모형실험을 수행한다.

표-3.8에 지형변동 수치모형실험의 실험개요를 요약하여 정리하였다.

표-3.8 지형변동 수치모형실험의 개요

구 분	내 용	비 고
실험목적	• 현재 대상해역의 지형변동상황 분석	
사용모형	• 국소표사량식에 의한 저면 변화량 산정모형	
모형구성	<ul style="list-style-type: none"> • 격자구성 (200×200격자) - 송도해수욕장 전면해역 (1.0km×1.0km) - 격자간격 : 5m - 격자수 : 40,000개 	해빈류 실험과 동일
입력자료	• 파랑제원 : SSE파향 1/3 최대유의파 제원	
	• 수심자료: 수심측량자료(2001년, 2004년) 및 최신해도	
기준해수면	• 대상해역의 삭망평균만조위(H.W.L) : 143.0 cm	
실험안	<ul style="list-style-type: none"> • 과거안(2001년 12월), 잠제설치시(2004년 6월), 잠제+돌제설치시(2004년 12월) • 파향 : SSE 	
재현기간	• 1년	

(2) 실험조건

지형변동 수치모형실험은 그림-3.13의 해빈변형 수치모형실험의 흐름도에서 나타난 것과 같이 파랑장 및 해빈류장의 계산결과를 주외력으로 이용하기 때문에 해빈류 실험과 동일한 실험조건과 실험안에 대하여 SSE계열의 이상파랑에 대하여 수치모형실험을 수행하였다. 따라서, 파랑제원, 조위조건, 수심입력, 격자구성, 실험안 등의 수치모형실험에 대한 실험조건은 3.1.1절, 3.1.2절의 수치모형 실험조건과 동일하다.

(a) 지형변동 재현기간

지형변동 수치모형실험은 파향별 파고계급별 출현빈도 표-3.3, 3.4로부터 각 파향별 입사파고비에 대한 에너지 가중을 출현율에 고려하여 1년간의 재현기간에 해당하는 지형변동 계산일수를 산정하였으며, 산정된 SSE파향의 지형변동 계산일수를 표-3.9에 정리하였다.

표-3.9 년간 파향별 지형변동 계산일수 산정

구분 \ 파향	SSE
년간 지형변동 계산일수 (일/년)	2.0

(3) 사용모형

지형변동을 예측하는 방법 중에 구조물이 설치되어 있을 경우에는 각 지점에서의 표사이동량 즉, 부상 Flux와 침강 Flux의 차에 의한 국소지형변동량을 산출하여 전체적인 지형변동 상황을 모의하는 모형이 가장 신뢰성 있는 방법이라 할 수 있다. 본 수치모형실험에서 사용된 모형은 국소표사량식에 의한 저면 변화량을 산정하는 Power모형(Bagnold, 1963)을 사용하였으며, 3.1.3절에서 검토된 해빈류 수치모형실험의 산출결과를 입력조건으로 지형변동 수치모형실험을 수행하여 각 해안에서 단기적 해빈변형 상황을

예측할 수 있다.

지형변동 계산에 있어서 저질의 연속방정식은 식(3.8)과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -\frac{\partial h}{\partial t} = -\frac{\partial q'_x}{\partial x} - \frac{\partial q'_y}{\partial y} \quad (3.8)$$

여기서,

$$\partial q'_x = q_x - \epsilon_s \left| q_x \right| \frac{\partial z_b}{\partial x}$$

$$\partial q'_y = q_y - \epsilon_s \left| q_y \right| \frac{\partial z_b}{\partial y}$$

그리고, z_b 는 지형변동량, $q_x = q_{wx} + q_{cx}$ 는 x 방향의 파와 흐름에 의한 표사량, $q_y = q_{wy} + q_{cy}$ 는 y 방향의 파와 흐름에 의한 표사량, $q_{wx}, q_{cx}, q_{wy}, q_{cy}$ 는 파와 흐름에 의한 표사량, ϵ_s 는 무차원계수 (지형안정화 계수)를 나타낸다.

지형변동의 계산은 국소표사량 평가식을 이용하였으며, 다음의 식(3.9), (3.10)에서 q_c, q_w 는 각각 흐름에 의한 표사량과 파향의 파동성분에 의한 표사량이다.

$$q_c = A_c (u_*^2 - u_{*c}^2) \cdot u/g \quad (3.9)$$

$$q_w = A_w \cdot F_d (u_* - u_{*c}^2) \cdot u_b/g \quad (3.10)$$

여기서, u 는 흐름의 평균유속, u_* 는 파와 흐름의 공존장에서 저면마찰속도,

u_b 는 파의 궤도유속의 진폭, u_{*c} 는 저질이동한계의 마찰속도, A_c, A_w 는 무차원계수, F_d 는 표사방향함수, g 는 중력가속도이다.

위의 식에서 이동한계 마찰속도(u_{*c})는 Shield수 $\Psi_m = u_*^2/sgd$ 를 이용하여 한계 Shield수 Ψ_c 에 관한 식으로부터 다음 식(3.11)과 같이 구해진다.

$$u_{*c} = \sqrt{sgd\Psi_c} \quad (3.11)$$

여기서, $\Psi_c \approx 0.11$ (가는 모래), 0.06 (굵은 모래), s 는 저질의 수중비중 $((\rho_s - \rho)/\rho)$, ρ_s, ρ 는 모래와 물의 밀도, d 는 저질입경이다.

가는 모래 및 굵은 모래에 해당하는 모래입경의 판정은 진동류 경계층 두께의 척도를 나타내 주는 매개변수 $\delta_L = \sqrt{\nu T/\pi}$ (ν : 동점성계수)를 이용하여 $\delta/\delta_L > 1/6.5$ 이면 가는 모래, $\delta/\delta_L > 1.4$ 이면 굵은 모래로 판정한다. 이와 같이 쇄파대내에서는 심해파에 비해서 저질이 이동하기 쉽다는 점을 고려하여 해빈에서의 저질의 이동한계 마찰속도를 다음과 같이 평가한다.

$$u_{*c} = 0 : \text{쇄파대 내}$$

$$u_{*c} = \sqrt{sgd\Psi_c} \cdot h(\kappa_c X_b/x_b) : \text{쇄파대 외}$$

여기서, κ_c 는 쇄파점을 경계로 하여 u_{*c} 을 연속시키는 무차원계수, X_b 는 쇄파대폭, x_b 는 쇄파점으로부터 심해방향으로 취한 거리이다.

식(3.12)에서 사용되는 표사방향함수(F_d)는 파에 의한 표사방향(해안 또는 심해방향)을 나타내 주는 함수로서 다음 식(3.13)으로 평가할 수 있다.

$$F_d = \tanh\left(\kappa_d \frac{\psi_c - \psi}{\psi}\right) \quad (3.12)$$

$$\psi = \frac{u_b^2}{sgd} \frac{h}{L_0} \quad (3.13)$$

여기서, F_d 는 표사방향함수로 표사의 방향이 해안방향일 경우 양으로, 심해방향일 경우는 음으로 된다. 또한, κ_d 는 무차원계수로 표사방향의 변화점 부근에서의 표사량 변화의 정도를 나타낸다. 그리고, ψ_c 는 표사의 방향 변화점에서의 ψ 값이다. 결국, F_d 는 표사방향 판정지표 ψ_c 와 ψ 의 값에 의해 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\psi \leq \psi_c, F_d = 1 \quad (\text{해안측 방향})$$

$$\psi > \psi_c, F_d = -1 \quad (\text{심해측 방향})$$

(4) 실험결과

송도해수욕장 해역의 과거상태와 잠제설치시와 잠제+돌제설치시에 대한 1년간의 SSE파향의 지형변동 수치모형실험 결과를 그림-3.17~3.19에 도시하였다. 과거상태에 대한 지형변동 실험결과에 의하면 해안의 Vortex흐름에 의해 침식·퇴적구간이 나타나고, 해빈류의 흐름보다는 파랑에 의해 해안 중앙부가 침식이 되는 것으로 판단된다. 해안부분에서 쇄굴이 많이 발생하여 침식이 되며, 이로 인해 서측 해안끝단에서 퇴적되는 양상을 보이는데 이는 해저지형 경사가 작기 때문에 일어나는 현상이다.

잠제설치시 잠제에 의한 영향으로 내습하던 파랑이 감쇠되어 내해쪽의 쇄굴·퇴적이 거의 나타나지 않는다. 잠제로 인해 내습하는 파랑이 작기 때문에 과거 송도해수욕장 전면해역에서 나타났던 침식·퇴적현상은 거의

사라지고 잠제 전면에서 쇄굴현상이 나타남을 알 수 있다. 이것으로 보아 잠제에 의한 파고감쇠효과가 탁월한 것을 알 수 있다.

잠제설치시와 잠제+돌제설치시에 대한 지형변동 실험결과는 돌제에 의한 쇄굴·퇴적이 크게 나타나지 않았고, 돌제 내측구간에서는 해빈류가 감쇠되어 양빈사 유실을 저감시킬 수 있을 것이라 추측되나 모니터링을 통한 지속적인 검토가 필요하며, 지형상황을 보다 면밀히 파악하여 수치실험을 수행하여야 할 것이다.

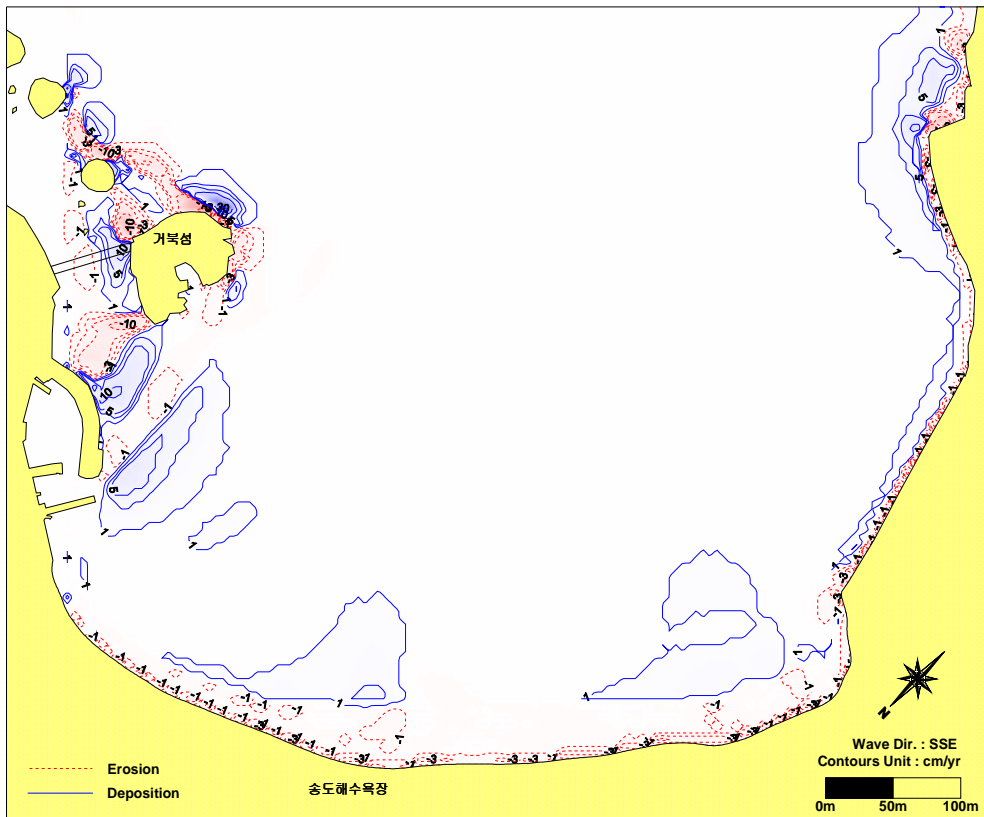


그림-3.17 지형변동 실험결과 (과거안, SSE, 재현기간 1년)

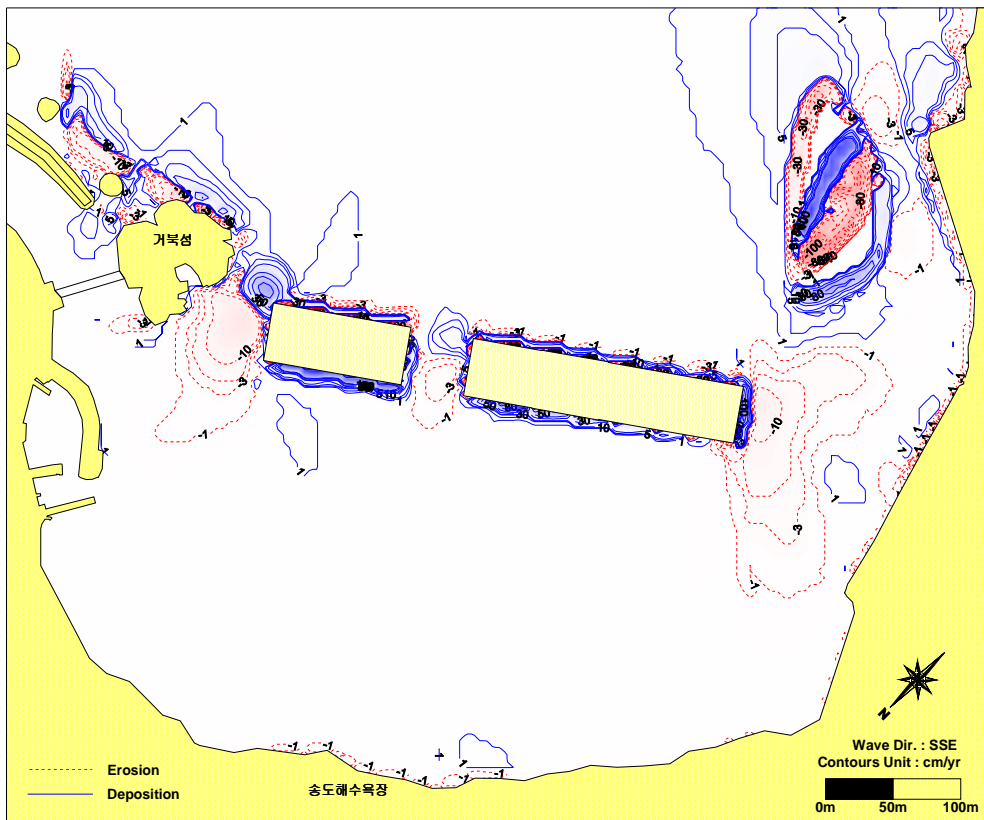


그림-3.18 지형변동 실험결과 (잠제설치시, SSE, 재현기간 1년)

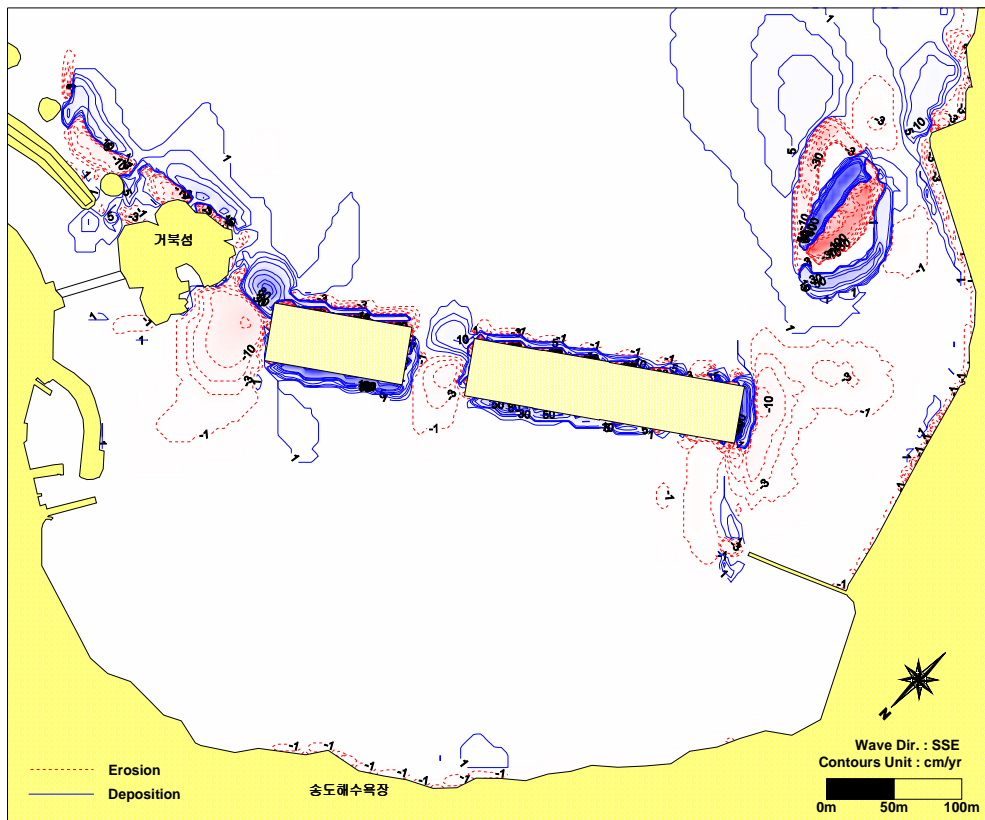


그림-3.19 지형변동 실험결과 (잠제+돌제설치시, SSE, 재현기간 1년)

3.2 해수유동 및 퇴적물이동 수치모형실험

3.2.1 개요

해수유동 수치모형실험은 부산송도 일대 해역의 해안수리현상을 재현하고, 일부 해역의 매립으로 인한 해안 수리학적 영향을 평가하고 예측하기 위한 것이며, 부유물확산 수치모형실험의 기본유속장으로 이용된다. 본 연구의 해수유동 계산에는 일본 大阪大學에서 개발된 ODEM을 사용하였다.

해수유동 수치실험은 모델의 수립, 검증 및 예측실험의 3단계의 과정으로 구분되는데, 모델의 수립이란 실험대상영역을 적절한 격자망으로 분할하여 해안선과 수심을 컴퓨터 내에서 재현하는 단계이다. 다음 과정인 모델의 검증은 수립된 모델을 적용하여 현 상태의 조석, 조류 등의 모델 계산치가 관측치와 잘 일치할 때까지 경계조건 및 모델의 각종 입력자료를 조정하는 과정이다.

3차원 해수유동 수치계산은 광역모델과 상세역모델로 구분하여 실시한다. 광역모델은 상세역모델의 계산을 수행하기 위한 개방 경계조건을 부여하기 위한 목적외에, 매립시에 발생하는 부유물이 주변해역에 미치는 영향을 평가·검토하기 위하여 실시되었다.

3.2.2 사용모형

(1) 기초방정식

기초방정식에서 다음을 가정한다.

- 흐름의 연직방향 가속도는 중력가속도에 비해 매우 작다. 즉, 연직방향의 압력분포는 정수압 분포를 갖는다.
- 유체는 비압축성이다.
- Boussinesq의 근사가 성립한다. 즉, 밀도의 변화는 압력항에서만 고려된다.

- 확산방정식에 의해서 수송되는 물질은 수온편차 ΔT 와 염분편차 ΔS 가 있다.
- 좌표계는 그림-3.20에 나타내는 평균수면을 원점으로 하고 연직상방향을 z 축으로 둔다. 해수의 유동을 지배하는 기초방정식은 아래에 나타내는 3방향 유속의 운동방정식, 연속방정식 및 부력의 확산방정식이다.

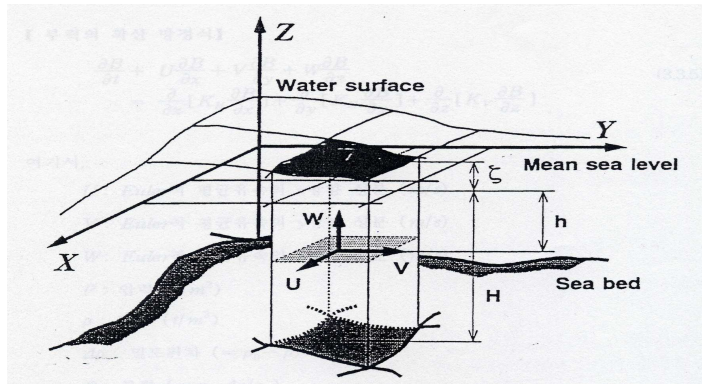


그림-3.20 기초방정식의 좌표계

연속방정식

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0 \quad (3.14)$$

운동방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = fV - \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial P}{\partial x} \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_V \frac{\partial U}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = & -fU - \frac{1}{\rho_a} \frac{\partial P}{\partial y} \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left(A_H \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_H \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_V \frac{\partial V}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$0 = -g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} \quad (3.17)$$

부력의 확산방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial B}{\partial t} + U \frac{\partial B}{\partial x} + V \frac{\partial B}{\partial y} + W \frac{\partial B}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial B}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial B}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_V \frac{\partial B}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (3.18)$$

여기서, U, V, W 는 Euler적인 평균유속의 x, y, z 방향성분(m/sec), P 는 압력(t/m^2), ρ 는 밀도(t/m^3), $\Delta\rho$ 는 밀도편차($=\rho_0 - \rho$), B 는 부력($=g \cdot \Delta\rho/\rho_0$), g 는 중력가속도($=9.8m/s^2$), f 는 Coriolis계수($=2\Omega\sin\Lambda_0$), V_H, V_V 는 수평 및 연직방향난류로 인한 와동점성계수(m^2/s), K_H, K_V 는 수평 및 연직방향난류로 인한 와동확산계수(m^2/s)이다.

식(3.17)에서 압력은 정수압분포가 된다. 수면의 위치를 $z = \zeta$ 로 하면, $z = -h$ 에서의 압력을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
P_{z=-h} &= \int_h^\zeta \rho g dz = \int_h^\zeta \rho_0 g dz - \int_h^\zeta \Delta \rho g dz \\
&= \rho_a g (\zeta - h) - \int_h^\zeta \Delta \rho g dz
\end{aligned} \tag{3.19}$$

식(3.19)에서 우변 제1항은 환경 기준밀도에 의한 압력이고, 임의의 수심에서 일정한 값을 취하게 된다. 우변 제2항은 밀도편차에 의한 압력, 즉 부력에 의한 압력의 감소분이다.

(2) 경계조건

대상해역의 수심을 $H(x, y)$ 라 하고, 각 변수에 대해 저면에서의 모든 양은 첨자 “b”를, 그리고 자유수면에서의 양은 첨자 “s”를 붙여서 나타낸다.

(a) 수면 ($z = \zeta$)에서의 경계조건

수면의 운동학적 경계조건은 수면경사가 미소하다고 가정한다.

$$W_s = \frac{\partial \zeta}{\partial t} - U_s \frac{\partial \zeta}{\partial x} - V_s \frac{\partial \zeta}{\partial y} \tag{3.20}$$

해역의 유동이나 수질변화에는 바람의 영향이 크다. 따라서, 물표면에서 바람응력으로 인한 전단응력이 작용하지 않는 경우와 작용하는 경우의 2가지 방법을 설정한다.

- 수면에서 전단력이 작용하지 않는 경우

$$(-\overline{u'w'}, -\overline{v'w'}) = \rho_s V_v \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial u}{\partial z} \right) = 0 \quad (3.21)$$

○ 수면에서 전단력이 작용하는 경우

$$(-\overline{u'w'}, -\overline{v'w'}) = \rho_s V_v \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial u}{\partial z} \right) = (T_{sx}, T_{sy}) \quad (3.22)$$

그리고, 수면을 통한 난류부력 Flux의 전달이 없는 것으로 한다.

$$-\overline{w'B} = K_v \frac{\rho B}{\rho_z} = 0 \quad (3.23)$$

(b) 해저면 ($z = -H(x, y)$)에서의 경계조건

해저면에서 경계조건은 다음과 같이 주어진다.

- 운동학적 경계조건 : 해저면의 연직방향 유속은 0이다.

$$W_b = 0 \quad (3.24)$$

- 해저면의 마찰로 인한 전단응력은 해저면 유속의 제곱에 비례하는 마찰 법칙을 이용한다.

$$(\tau_{xb}, \tau_{yb}) = (-\overline{u'w'}, -\overline{v'w'}) = \Upsilon_b^2 (u \sqrt{u^2 + v^2}, v \sqrt{u^2 + v^2}) \quad (3.25)$$

- 해저면으로부터의 난류부력 Flux는 없다.

$$-\overline{w'B} = K_v \frac{\partial B}{\partial z} = 0 \quad (3.26)$$

(c) 벽면에서의 경계조건

벽면의 법선방향으로 수위변동량은 동수경사를 가지지 않는다. 즉, 수위변동량에 대해서는 **Free-Slip**조건을 적용한다. 단, 첨자 “n”은 법선방향의 좌표를 의미한다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial x_n} = 0 \quad (3.27)$$

운동학적 조건은 벽면의 법선방향의 유속성분이 0으로 주어진다.

$$V_n = 0 \quad (3.28)$$

그리고, 벽면마찰에 의한 전단력은 벽면 유속의 제곱에 비례하는 마찰법칙을 이용한다.

$$-\overline{u_n B'} = K_H \frac{\rho B}{\rho x_n} = 0 \quad (3.29)$$

(d) 개경계($x = L$)에서의 경계조건

수위변동량에 대해서는 대상해역에서 조석의 경계조위진동을 아래 식과 같은 여현함수로 나타내는 변수로서 주어진다. 이 조건에서 주어진 조위의 조화정수는 해상자료의 조사를 통하여 구해진 값을 사용한다.

$$\zeta = H_{1/2} \cos \left(\frac{2\pi}{T_{1/2}} - \Phi_{1/2} \right) \quad (3.30)$$

여기서, $H_{1/2}$ 는 開境界部에서의 조위진폭, $\Phi_{1/2}$ 는 開境界部에서의 遲角을 나타낸다. 그리고, 開境界를 통한 운동량 Flux의 전달은 없는 Free-Slip조건을 적용한다.

$$-\overline{u'v'} = \nu_H \frac{\partial u}{\partial y} \text{ or } \nu_H \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (3.31)$$

$$-\overline{u'u'} \text{ or } -\overline{v'v'} = \nu_H \frac{\partial u}{\partial x} \text{ or } \nu_H \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \quad (3.32)$$

또한, 開境界를 통한 부력 Flux의 전달은 없다고 가정한다.

$$-\overline{u'B} \text{ or } -\overline{v'B} = K_H \frac{\partial B}{\partial x} \text{ or } K_H \frac{\partial B}{\partial y} = 0 \quad (3.33)$$

(3) 차분법에 의한 기초방정식의 이산화

차분격자망은 Staggered 격자를 사용한다. 이 격자망을 채용하면 각 변수의 정의위치 및 대상이 되는 Control Volume이 각각 다르게 된다. 여기서 각 변수의 위치는 다음과 같이 정의된다. ζ, P, ρ, B 의 위치는 동일 직선상에 정의되고, U, V 는 동일 평면상에 정의되는데, 그 결과 양자는 x, y 방향으로 각각 반격자만큼 떨어진 위치에 설정된다.

수위변동량 : $\zeta : x + \Delta x, y + \Delta y$

x 방향성분의 유속 : $U : x, y + \Delta y, z + \Delta z$

y 방향성분의 유속 : $V: x + \Delta x, y, z + \Delta z$

z 방향성분의 유속 : $W: x + \Delta x, y + \Delta y, z$

부력 : $B: x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z$

압력 : $P: x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z$

밀도 : $\rho_o: x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z$

수평방향 와동점성계수 : $A_H: x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z$

연직방향 와동점성계수 : $A_V: x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z$

기초방정식의 이산화방정식의 유도에는 岩佐 등(1983)이 사용한 **Control Volume**법을 채용하기로 한다. 즉, 운동방정식의 시간항에 대해서는 원칙적으로 중앙차분법(Leap Frog Method)을 사용한다. 이류항에 대해서는 풍상차분에 의한 차분화를 실시하고, 확산항에 대해서는 이류항, Coriolis Force항보다 1스텝 이전의 값(즉, 시간간격의 전진차분을 취한 것)으로 한다. 이것은 Leap Frog법을 사용하는 경우에 확산항을 다른 항과 같은 시간스텝의 값을 사용하여 계산하면 무조건 불안정이 되기 때문이다. 부력의 확산방정식에 대해서도 운동방정식과 동일한 방법으로 차분화한다.

(4) 자유수면의 취급

해수유동은 조석 등의 외력과 수면경사에 의한 동수경사력이 밀접하게 관련되어 있다. 따라서, 자유수면을 어떻게 엄밀히 표현하는가 하는 것이 유동의 재현성을 향상시키기 위한 관건이 된다.

일반적으로 수면의 표현방법에는 자유수면모델과 Rigid Lid모델의 두 가지 종류가 있다. 전자는 계산격자의 크기를 伸縮시킴으로써 수면형을 직접 표현하는 방법으로 그 기초가 되는 것은 수면의 운동학적 조건이다. 이 방법은 중력파에 의한 파동의 전달이 표현 가능하기 때문에 해역에서의 조석

류·밀도류 등을 나타내는 물리과정을 대상으로 하는 수치실험에서 자주 활용되고 있다.

한편, 후자는 Rigid Lid라는 이름이 나타나고 있듯이 고정된 마찰이 없는 “뚜껑”을 수평인 자유수면으로 두는 방법이다. 이 방법은 자유수면의 변동을 인정하지 않으므로 수면의 관성중력과 전달은 배제한다는 것을 의미한다. 이 모델은 해양대순환이나 태풍에 대한 해양의 운동을 논의하는 경우에 많이 이용되고 있다. 본 연구에서는 홍수시의 유입유량의 변동 및 조석 변동에 따른 해역에서의 자유수면의 변화량을 정확히 산출할 필요가 있으므로 전자의 자유수면 모델을 채용한다.

(5) 3차원 해수유동 수치모델의 알고리즘

여기서는 3차원 해수유동 수치모델에서 중요한 수위상승량을 음적 (Implicit Method)으로 푸는 알고리즘을 설명한다. 시각축에 대해서 $t = n\Delta t$ 와 $t = (n+1)\Delta t$ 에서의 수리제량이 기지량일 때, $t = (n+2)\Delta t$ 에서의 수리제량을 구하는 경우를 생각한다. 수위변동량 ζ 와 유속 U, V 에 대해 가중평균 파라메타 Θ 를 정의해서 다음과 같이 나타낸다.

$$\zeta = (1 - \Theta)\zeta^n + \zeta^{n+2} \quad (3.34)$$

$$U = (1 - \Theta)U^n + U^{n+2} \quad (3.35)$$

$$V = (1 - \Theta)V^n + V^{n+2} \quad (3.36)$$

여기서, ζ^{n+2} 는 미지량이므로 $\Theta \neq 0$ 일 경우에 차분식은 음해법(Implicit Method)이 된다.

식(3.14)의 연속방정식을 경계조건식(3.20), (3.24)를 이용하여 저면에서부

터 수면까지 적분하고, 시간축에 대해서만 중앙차분을 이용하여 차분화하면 다음과 같은 식이 구해진다. 이 때 유속에 대해서는 식(3.35), (3.36)의 가중평균 파라메타로 정의한 변수를 사용한다.

$$\begin{aligned} \frac{\zeta^{n+2}}{2\Delta t} = & - \int_{-H}^{\zeta} \frac{\partial}{\partial x} [(1-\Theta) U^n + \Theta U^{n+2}] dz \\ & - \int_{-H}^{\zeta} \frac{\partial}{\partial y} [(1-\Theta) U^n + \Theta U^{n+2}] dz \end{aligned} \quad (3.37)$$

또한, 식(3.34)에서 정의한 수위상승량을 이용하여 식(3.15), (3.16)의 운동방정식을 차분화하고 각각 U^{n+2} , V^{n+2} 에 대해서 정리하면, 식(3.38)과 같이 ζ^{n+2} 를 종속변수로 갖는 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} U^{n+2} &= \frac{U^n}{\Delta t} func[\zeta^{n+2}, \zeta^n, U^{n+1}, U^n, V^n] \\ V^{n+2} &= \frac{V^n}{\Delta t} func[\zeta^{n+2}, \zeta^n, U^{n+1}, U^n, V^n] \end{aligned} \quad (3.38)$$

운동방정식으로부터 구해진 식(3.38)을 연속방정식으로부터 구해진 식(3.37)에 대입하고, 동시에 공간에 대해서도 차분화하면 식(3.39)와 같은 ζ^{n+2} 에 관한 연립일차방정식이 유도된다.

$$\zeta_{i,j}^{n+2} = A_0 + A_1 \zeta_{i+1,j}^{n+2} + A_2 \zeta_{i-1,j}^{n+2} + A_3 \zeta_{i,j+1}^{n+2} + A_4 \zeta_{i,j-1}^{n+2} \quad (3.39)$$

단, 공간축에 대해서는 $x = i\Delta x$, $y = j\Delta y$ 로 두고, $A_0 \sim A_4$ 는 시간스텝 n 및 $(n+1)$ 로 표현되는 기지량이다. 이 식은 타원형편미분방정식의

차분식과 같은 구조를 가지며, 그 해법으로 SOR법이 사용한다.

(6) 계산의 순서

흐름장의 예측은 가중평균 파라메타를 이용한 음해법을, 하천수의 유입에 의한 부력의 확산예측에는 완전 양해법에 의한 수법을 이용한다. 흐름의 안정성을 고려해서 가중평균 파라메타를 0.75로 한다. 또한, 시간항을 차분화할 때 중앙차분을 이용하기 때문에 생기는 계산결과의 노이즈를 제거하기 위해 30스텝에 1회의 비율로 Matsuno(1996)의 방법에 의해 시간의 차분화에 전진차분을 조합한다. 계산의 1스텝은 다음과 같은 순서로 진행한다.

- 식(3.39)에서 구해진 ζ^{n+2} 에 관한 연립일차방정식을 SOR법으로 푼다.
- ζ^{n+2} 를 바탕으로 식(3.19)를 이용하여 P^{n+2} 를 구한다.
- P^{n+2} 를 바탕으로 식(3.15)를 이용하여 U^{n+2} 를, 식(3.16)을 이용하여 V^{n+2} 를 구한다.
- U^{n+2}, V^{n+2} 를 바탕으로 식(3.15)를 이용하여 W^{n+2} 를 구한다. 이 때 계산은 底面에서부터 수면까지 순차적으로 계산한다.
- $U^{n+2}, V^{n+2}, W^{n+2}$ 를 바탕으로 식(3.18)를 이용하여 부력 B^{n+2} 를 구한다.

3.2.3 모형수립 및 실험방법

(1) 계산영역 및 수치모형실험 Case

3차원 해수유동 수치계산은 광영역과 상세영역으로 나누어 계산을 실시하였다. 광영역의 경우에 수심은 수치해도를 기준으로 하였다. 각 격자의 수심입력자료에 이용한 자료는 표-3.10과 같다. 그림-3.21, 3.22는 본 연구의

대상해역의 광영역 및 상세역의 등수심도를 나타내고, 그림-3.23, 3.24는 계산영역의 3차원지형도를 나타낸 것이다. 그림-3.25, 3.26은 계산영역의 격자망도를 나타낸다.

본 연구에서 실시한 3차원 해수유동 수치실험의 개요 및 실험 Case의 일람을 표-3.11에 나타낸다. 상세역의 개방경계에서의 경계조건은 광영역 모델의 계산결과에 대하여 부산항 관측소(T-2지점)에서의 조석관측 결과의 검증을 기초로 하여 설정하였다.

표-3.10 해수유동 수치모형실험의 수심 입력자료에 사용된 해도

해 도 명	축 적	간 행 처
수치해도 No.201	1:10,000	국립해양조사원
수치해도 No.201b	1:10,000	국립해양조사원
수치해도 No.202	1:50,000	국립해양조사원

표-3.11 3차원 해수유동 수치모형실험

구 분	광역 모델	상세역 모델
사용모델	ODEM	
계산범위	부산항~송도 일대해역 (7.4km×9.2km)	송도해수욕장 일대 해역 (2.2km×3.2km)
격자체계	$\Delta x = 50m, \Delta y = 50m$	$\Delta x = 20m, \Delta y = 20m$
격자수	148×184 개	110×160 개
경계조건	개경계에서의 M2 + S2 분조	광역 모델의 계산결과
실험내용	* case 1 : 현재상태 * case 2 : 매립시	* case 1 : 현재상태 * case 2 : 매립시

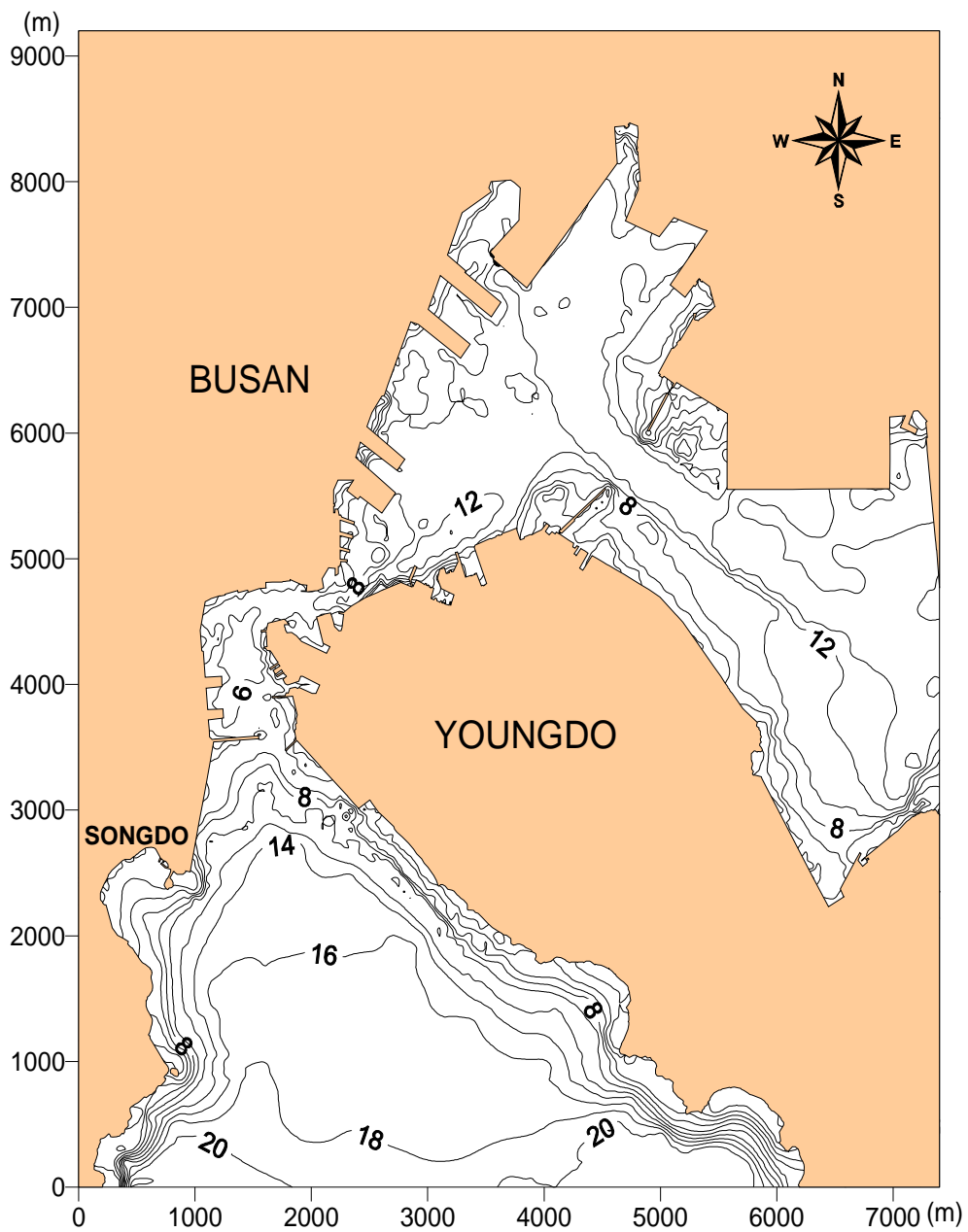


그림-3.21 계산대상 영역의 등수심도(광역)

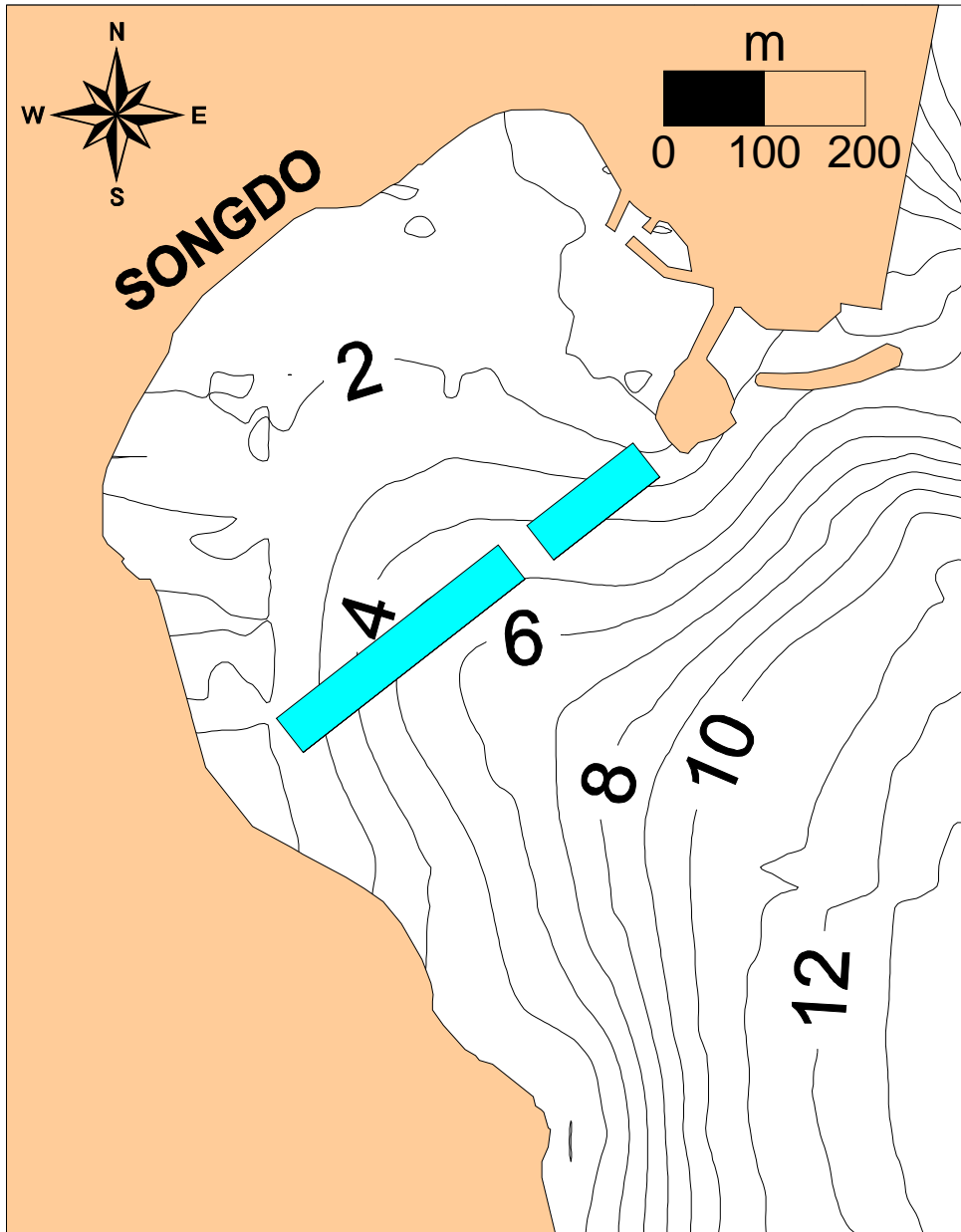


그림-3.22 계산대상 영역의 등수심도(상세역)

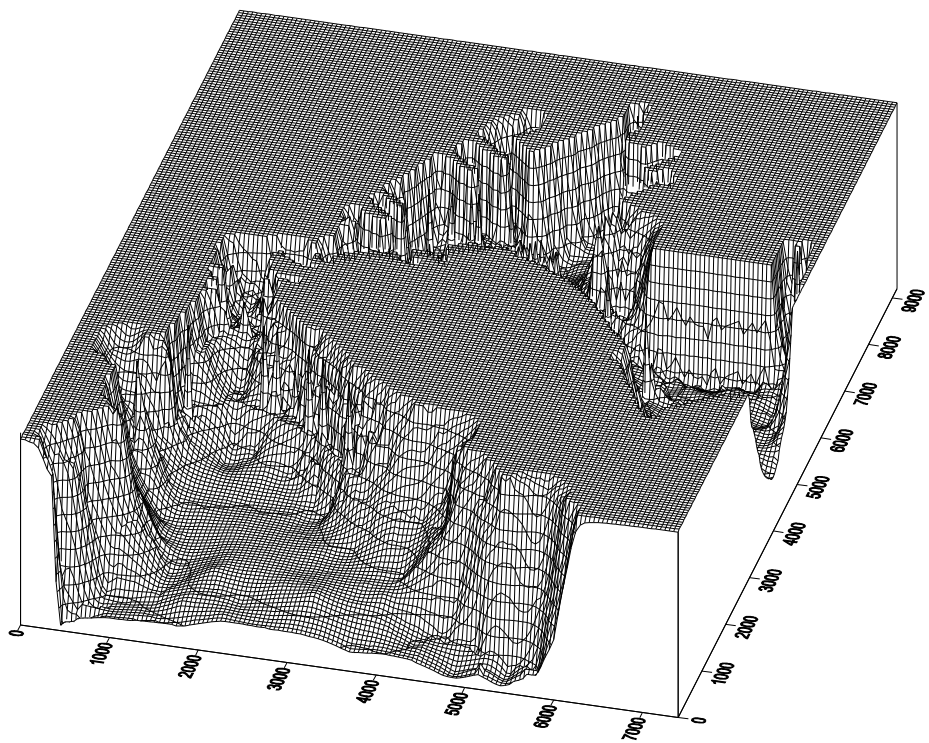


그림-3.23 계산대상 영역의 3차원지형도(광역)

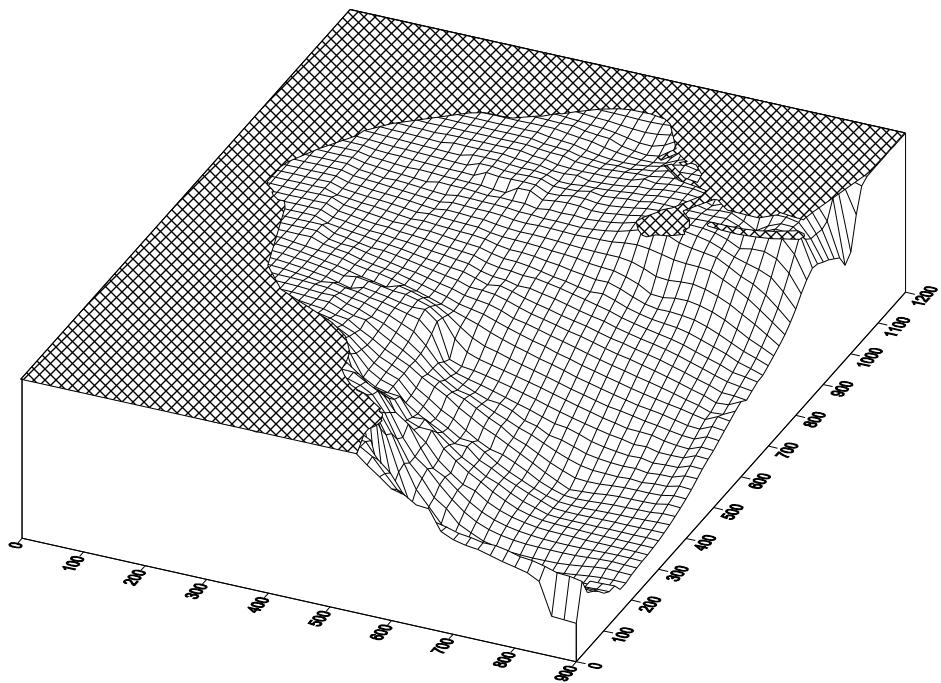


그림-3.24 계산대상 영역의 3차원 지형도(상세역)

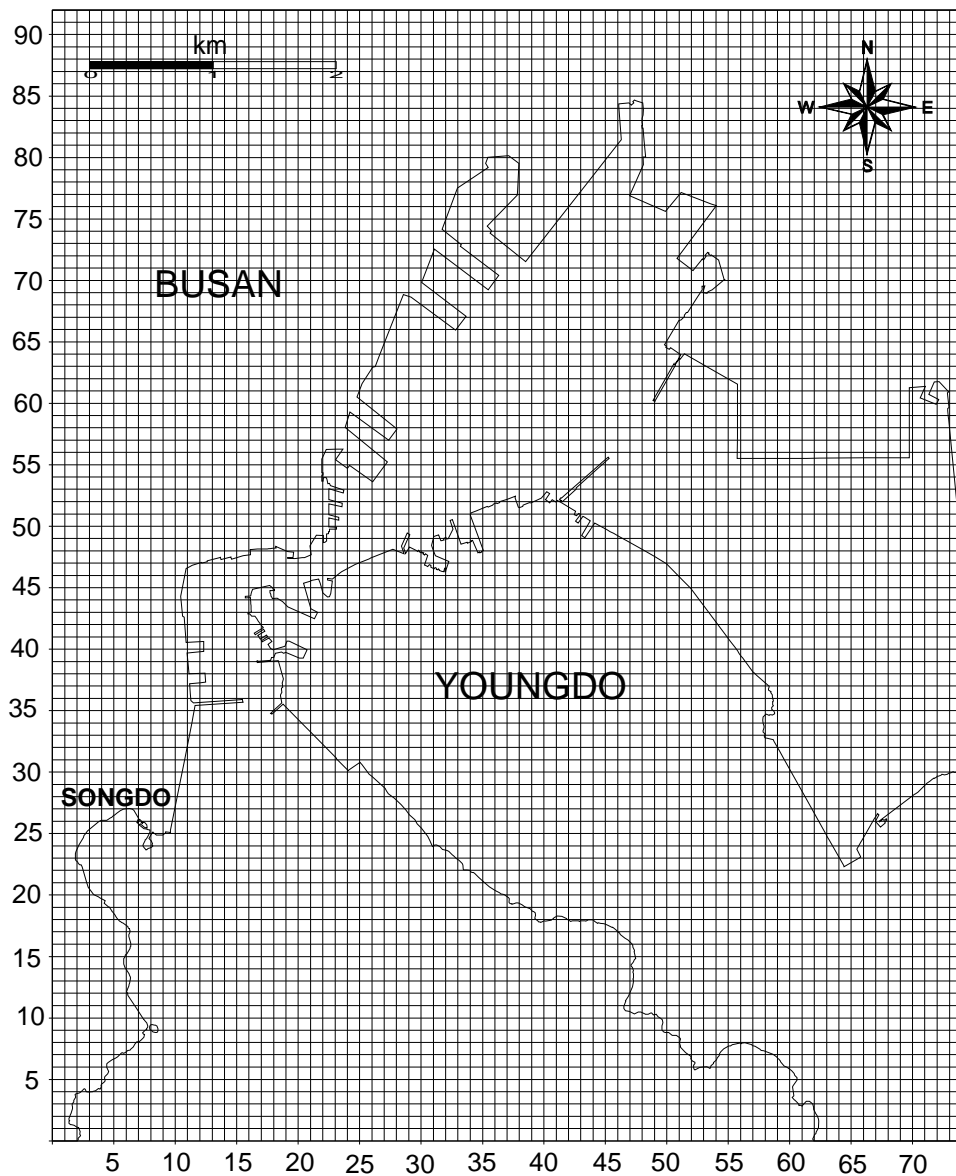


그림-3.25 계산영역의 격자망도(광영역)

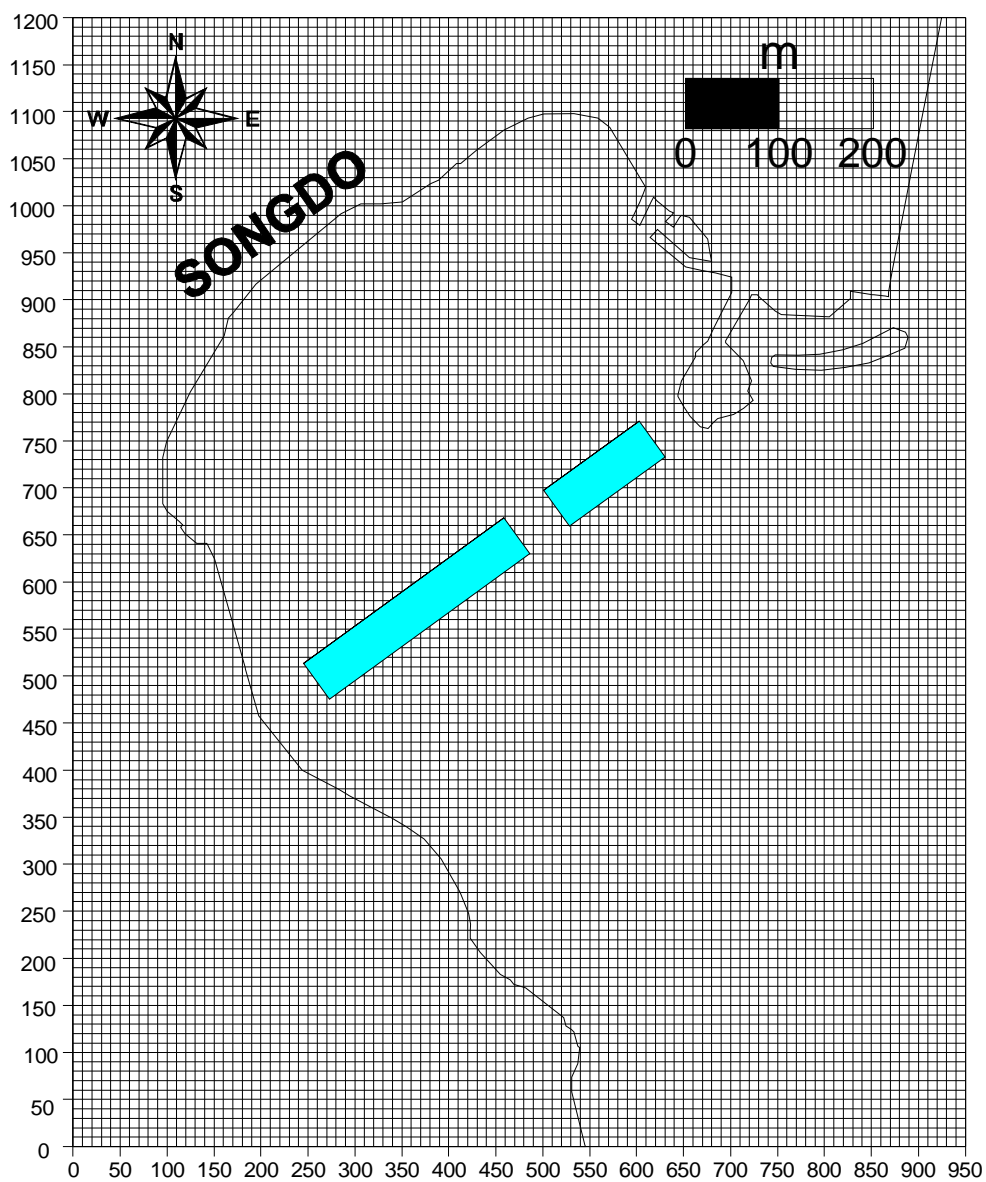


그림-3.26 계산영역의 격자망도(상세역)

(2) 개경계에서의 경계조건

송도에서의 조석관측결과에 의하면, 대상해역의 조석형태수는 0.1~0.2로서 M2분조와 S2분조가 탁월한 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구에서는 기존에 관측된 M2분조 및 S2분조의 조화상수를 개경계부의 경계조건으로 입력하여 수치모형실험을 실시한다. 표-3.12은 외해 경계조건 및 검증자료로 이용된 기존의 조석관측자료를 나타낸다.

표-3.12 기존의 조석 관측자료

위 치	M2 분조		S2 분조		비 고
	반 조 차	지 각	반 조 차	지 각	
T-1 지점	40.9cm	239.9°	20.0cm	277.0°	
T-2 지점	40.4cm	238.3°	21.1cm	261.9°	
T-3 지점	36.5cm	232.4°	18.1cm	274.6°	
T-4 지점	40.0cm	232.8°	18.9cm	261.3°	

(3) 저면마찰계수

저면마찰계수 Υ_b 는 아래의 값을 사용하였다.

$$\Upsilon_b = 2.6 \times 10^{-3}$$

(4) 와동점성계수 및 와동확산계수

본 계산에서 사용한 수평방향 및 수직방향의 와동점성계수 값은 아래와 같으며, 와동확산계수 값은 와동점성계수와 동일한 값을 주었다.

(a) 광영역

$$\nu_H = K_H = 10.0 (m^2/s)$$

$$\nu_{V0} = K_{V0} = 0.005 (m^2/s)$$

(b) 상세영역

$$\nu_H = K_H = 1.0 (m^2/s)$$

$$\nu_{V0} = K_{V0} = 0.001 (m^2/s)$$

(5) 차분간격

현지지형 및 해수욕장 매립계획안의 형상을 표현하기 위해 Δx , Δy 와 연직방향의 분할층수를 표-3.13과 같이 설정하였다. 차분의 시간간격은 CFL(Courant-Friedrich-Lewy)안정조건을 고려하여 표-3.13과 같이 설정되었다.

표-3.13 차분간격의 일람표

구분	광영역	상세영역
Δx	50m	20m
Δy	50m	20m
분할층수	7층	8층
Δt	5 sec	1 sec

3.2.4 실험결과 및 고찰

본 연구에서는 대상영역에서의 조류속에 대한 관측결과의 확보가 어려운 관계로 광영역 모델에 의한 계산결과에 대하여 조위진폭과 지각(Phase)의

관측치를 비교함으로써 본 수치모델의 적용성을 검증하였다. 표-3.14는 조류의 수치계산 결과가 정상상태에 도달하였다고 판단된 시점에서 부산항 관측점(T-4)의 조위변동을 조화분해에 의해 주파수 분해하여 구해진 12시간 주기성분의 조위진폭과 지각(Phase)을 현지 관측자료와 비교한 것이다.

표-3.14에서 알 수 있듯이, 조위진폭에 대해서 T-4지점에서는 관측치가 40.0cm, 수치계산결과는 38.6cm로써 관측치와 미소한 차이를 나타내고 있으나, 대상해역에서의 조석특성을 비교적 잘 재현하고 있는 것으로 판단된다. 또한, 지각(Phase)에 대해서도 관측치와 계산치에 미소한 차이는 있으나, 대체적으로 대상해역의 조석특성을 잘 재현하고 있는 것으로 나타났다. 따라서, 본 수치모델은 대상해역에서의 조위변동특성을 잘 재현하고 있다고 생각된다.

그림-3.27, 3.28은 송도해수욕장에 대해 광역모델에 의한 최강창조류시 및 낙조류시의 해수유동 계산결과를 나타낸다. 해수유동 수치계산결과에 의하면 낙조류가 창조류보다 우세하며, 낙조류의 지속시간이 창조류보다 길게 나타났다.

이상의 광역의 계산결과를 바탕으로 상세역에서의 해수유동 수치계산을 실시하여 송도해수욕장 인근해역에 대한 해안수리학적 영향을 검토하였다. 그림-3.29, 3.30은 상세역모델에 의한 최강창조류 및 낙조류시의 해수유동 계산결과를 나타낸다. 상세역모델에 의한 해수유동 수치실험 계산결과를 보면, 그림-3.29, 3.30에서 알 수 있듯이 송도해수욕장은 동측으로부터 서측해안으로의 흐름이 탁월하며, 외해측의 유속은 1.0~3.0m/s, 만 내의 유속은 1.0m/s~0.5m/s, 잠재 내측의 경우 0.5m/s 미만으로 나타났다.

그림-3.29, 3.30에 나타내는 상세역의 계산결과에서 알 수 있듯이 송도해수욕장내의 조류의 유속은 해빈류장에 비해 작은 것으로 나타나며, 해수욕장내의 구조물 설치에 의해 해수유동에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단된다. 한편, 추후 관측결과를 바탕으로 송도해수욕장의 양빈 및 지형변동의 영향에 따른 해수유동의 영향을 검토하고자 한다.

표-3.14 조위 및 지각의 관측치와 계산치의 비교

관측점	관 측 치		계 산 치	
	조위진폭(cm)	지각(deg.)	조위진폭(cm)	지각(deg.)
T-4	40.0	232.8	38.6	233.9

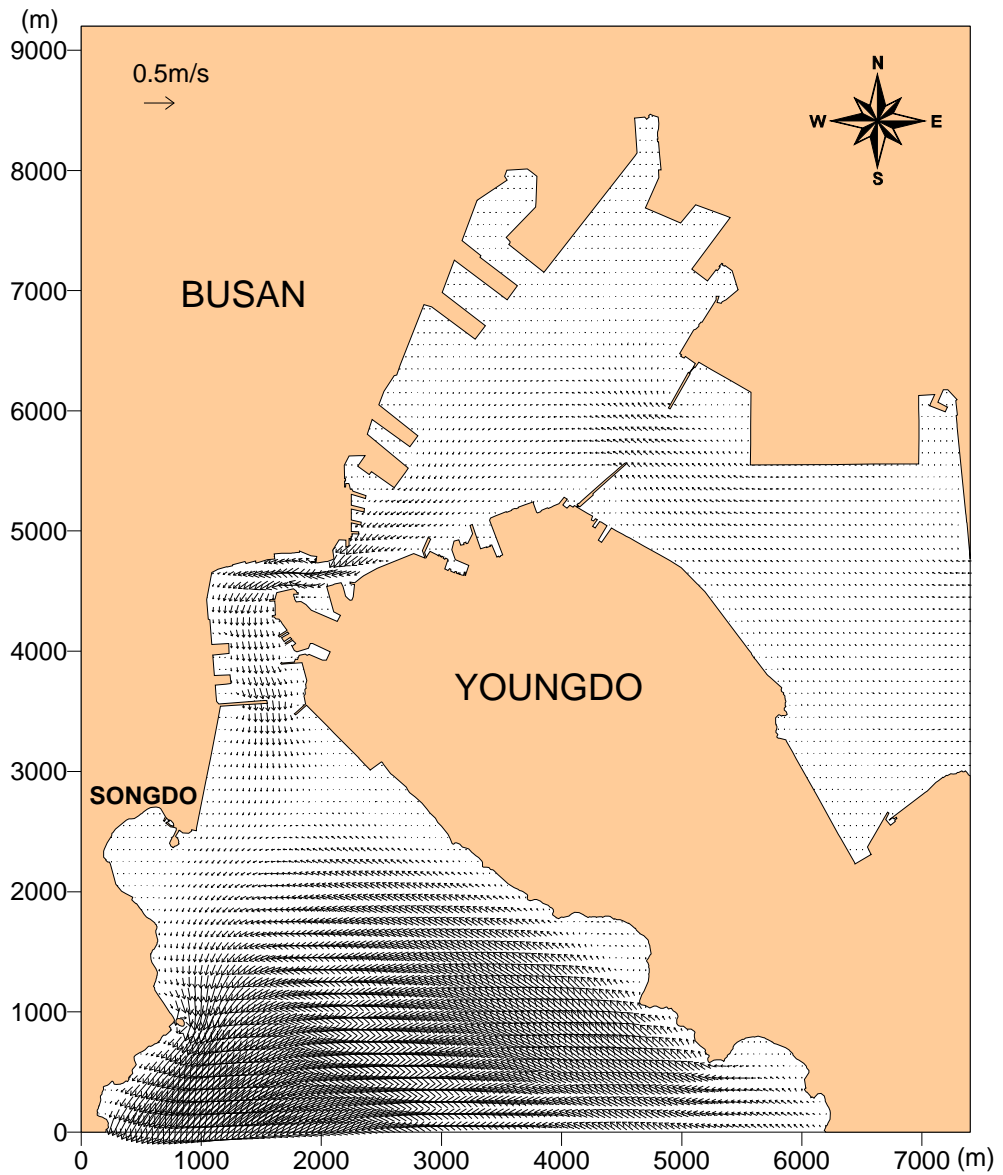


그림-3.27 최강 창조류시의 유속분포(광역역, 제1층)

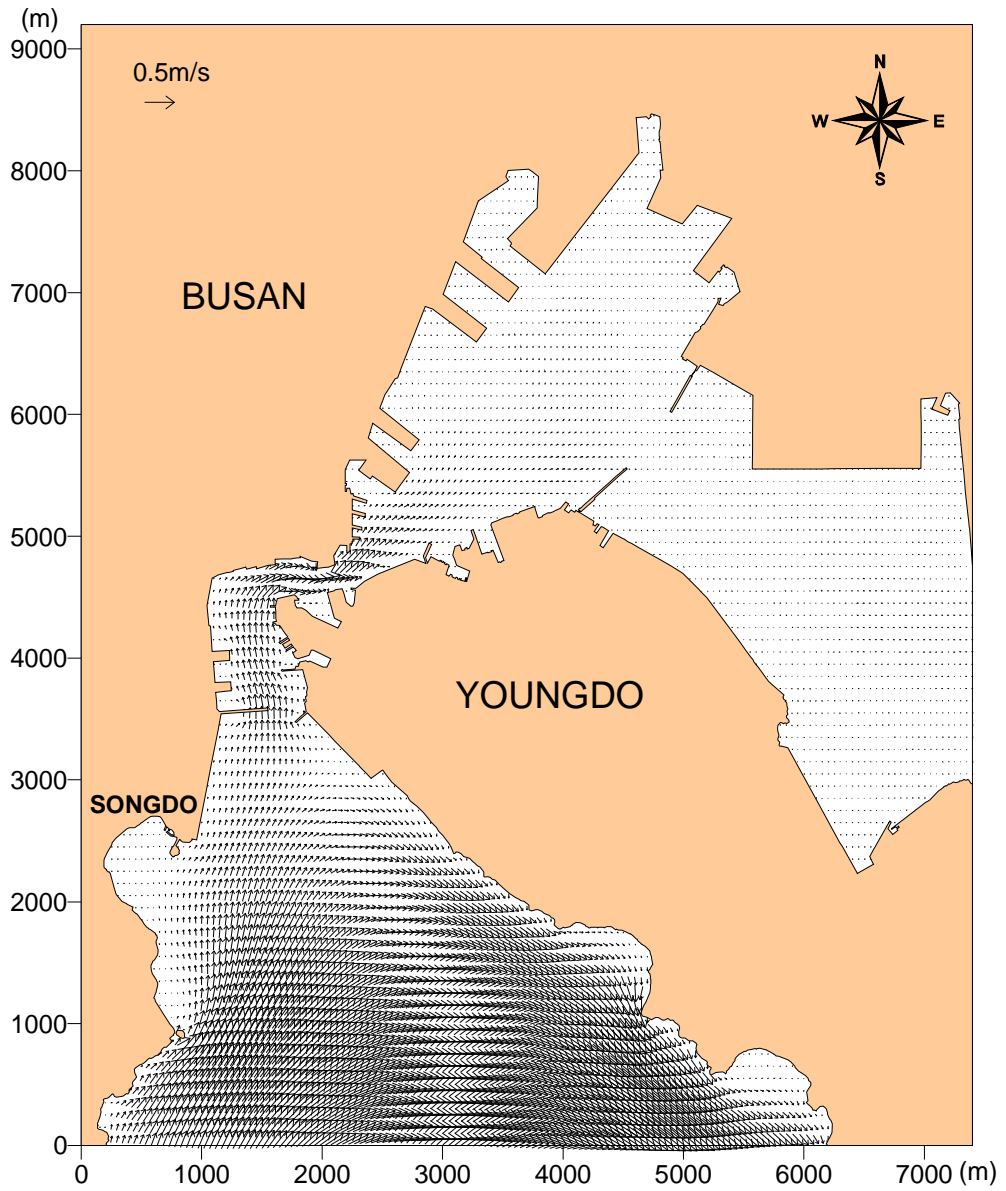


그림-3.28 최강 낙조류시의 유속분포(광영역, 제1층)

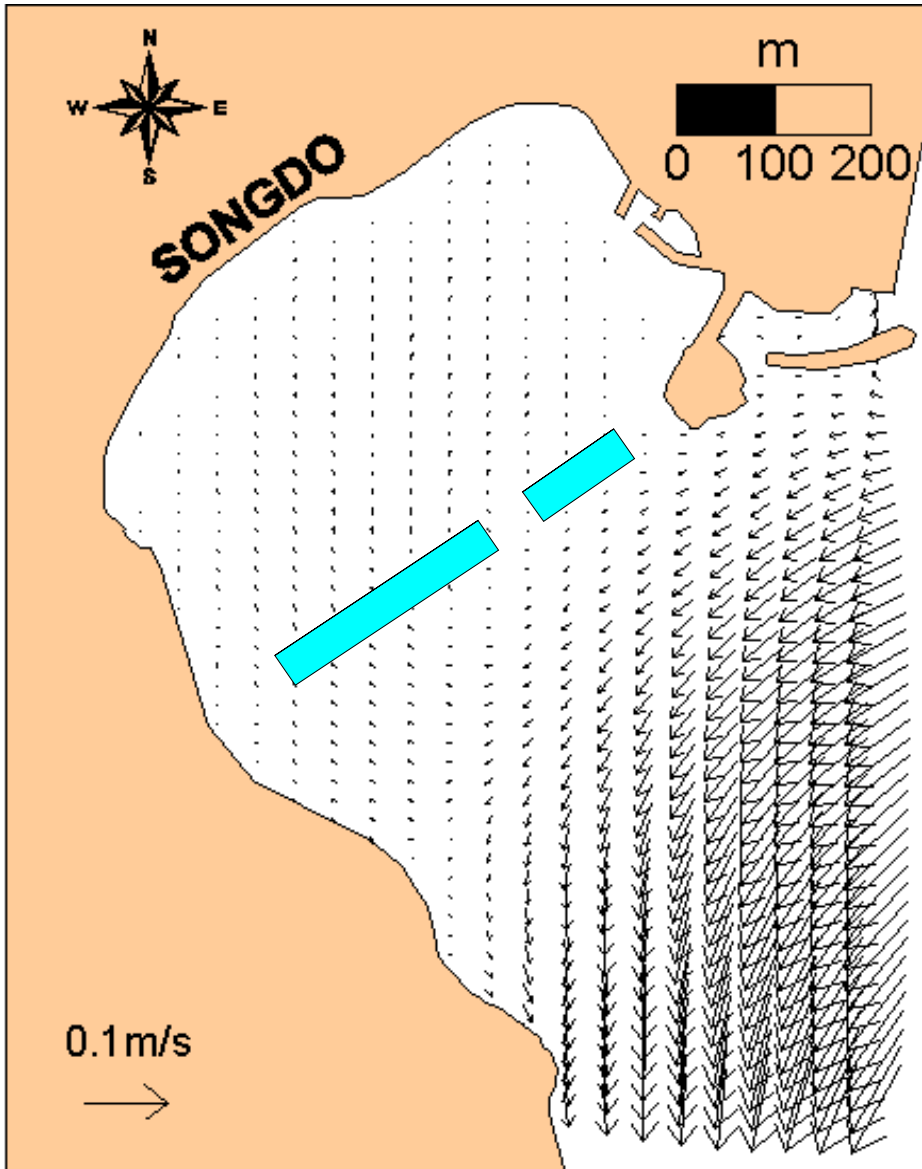


그림-3.29 최강 창조류시의 유속분포(상세역, 제1층)

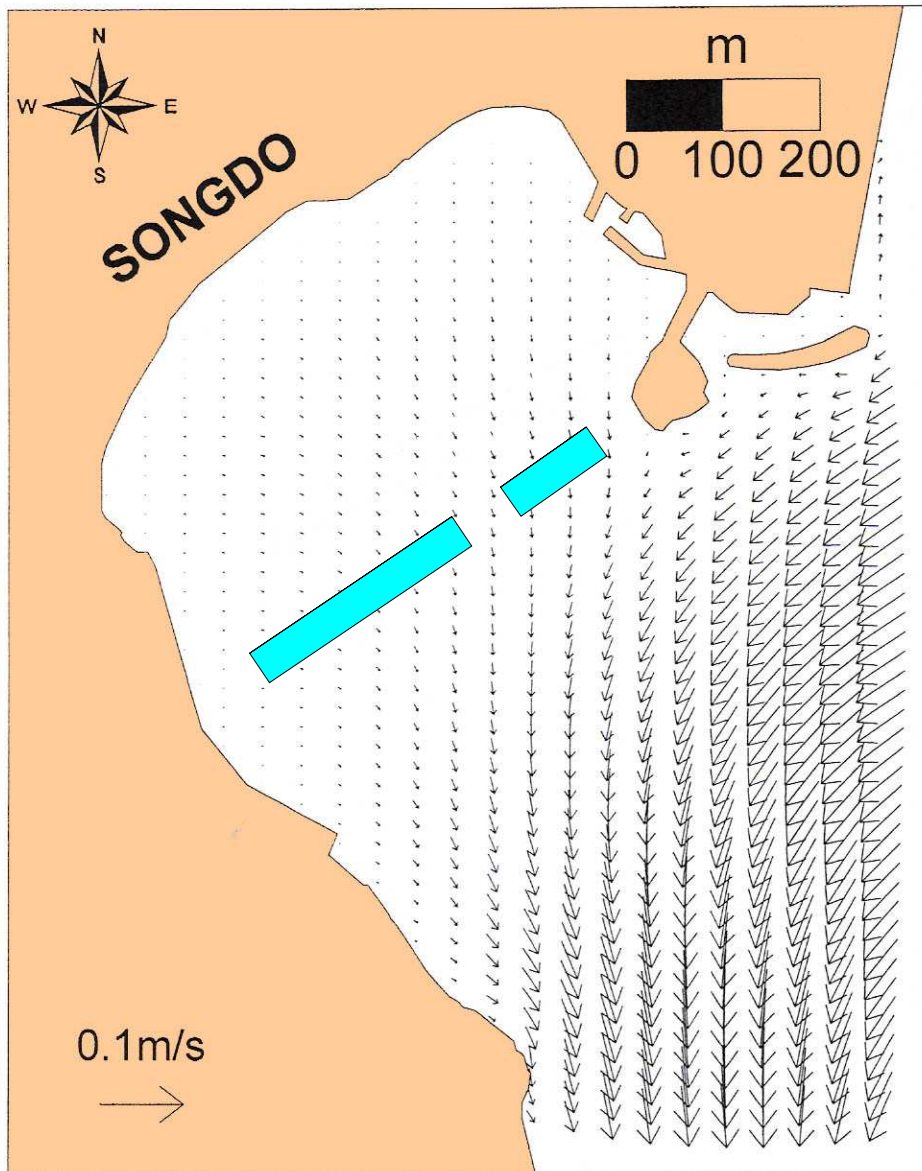


그림-3.30 최강 낙조류시의 유속분포(상세역, 제1층)

3.3 해안선변화 수치모형실험

3.3.1 개요

본 연구에서의 해안선변형 수치모형실험은 연안표사량의 장소적 변화와 해안선의 전진 또는 후퇴를 연결시키는 연속식에 근거하여 그 변화를 산정하는 방법으로, 대상해역의 현상황에 대한 해안선변화 양상을 예측·평가하기 위해서이다. 해안선변형 수치모형실험은 파랑장 실험결과를 입력자료로 하여 수치실험을 수행한다.

표-3.15에 해안선 변형 수치모형실험의 실험개요를 요약하여 정리하였다.

표-3.15 해안선변형 수치모형실험의 개요

구 분	내 용	비 고
실험목적	• 현상태에 대한 해안선의 변동상황예측	
사용모형	• 연안표사량식에 의한 해빈변형 예측모형	
모형구성	<ul style="list-style-type: none"> • 격자구성 ($\Delta_S = 360$) - 송도해수욕장 전면해역 - 격자간격 : 5m - 격자수 : 180,000개 	
입력자료	• 파랑제원 : 파향별 1/3 유의파 제원 (E~SW)	
	• 수심자료 : 수심측량자료(2004년 6월) 및 최신해도	
기준해수면	• 평균해면(M.S.L) : 64.9 cm	
실험안	<ul style="list-style-type: none"> • 과거안(2001년 12월), 잠제설치시(2004년 6월), 잠제+도류제설치시(2004년 12월) • 파향 : E~SW 	
재현기간	• 5년	

3.3.2 실험조건

해안선변형 수치모형실험은 파랑장 계산결과를 주외력으로 이용하기 때문에 파랑변형 수치모형실험을 수행하여 E, ESE, SE, SSE, S, SSW, SW 등 7가지 계열의 파랑에 대하여 수치모형실험을 수행하였다. 또한, 조위조건, 수심입력, 격자구성 등의 수치모형실험조건에 대해서는 3.1.2절의 해빈류 수치모형실험 부분과 동일하다.

(1) 파랑제원

본 송도해역의 해빈변형 수치모형실험에 적용한 입력파랑제원은 해양연구원에서 제시된 장기파랑산출자료(한국해양연구원, 2003) 중 파향별 파고계급별 출현빈도 및 주기별 파고계급별 출현빈도를 나타낸 표-3.2, 3.3의 결과를 이용하여 산정하였으며, 지형특성상 송도해역에 대해 개방되어 있는 E, ESE, SE, SSE, S, SSW, SW 등 7가지 계열의 파랑에 대하여 파랑변형 수치모형실험을 수행하였다.

파랑변형 수치모형실험의 파랑제원 중 파고는 전술한 장기파랑산출자료의 파랑자료를 이용하여 각 파향별로 $H_{1/3}$ 를 사용하였으며, 주기는 모든 파향에 대한 파고계급별 주기별 출현빈도로부터 파고계급에 대해서 누적출현율이 95%에 해당하는 주기를 그 파고계급의 대표주기로 설정하였다.

송도연안의 파랑변형 수치모형실험에 적용된 파랑제원을 표-3.16에 정리하였다.

(2) 도달 파랑제원 산출

결정된 파랑제원은 심해측의 파랑을 추정한 자료를 이용한 것이므로 이를 대상해역이 위치한 비교적 수심이 낮은 해역의 수치모형에 적용하기 위해서는 심해에서부터 수치모형의 입사경계부까지의 파랑변형과정이 고려된 도달파 제원을 산정하여야 한다. 따라서, 본 연구에서는 천해역의 파랑변형 상황검토를 위한 도달 파랑제원을 산출하기 위하여 에너지평형방정식 모형

을 이용한 심해역 파랑변형 수치모형실험을 수행하였으며, 산출된 천해역 수치모형실험의 도달파랑 제원을 표-3.16에 정리하였다.

표-3.16 심해역 파랑변형 수치모형실험의 적용 파랑제원

구 분		E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW
심 해 역	$H_{1/3}$	0.99	0.97	0.95	1.01	0.88	1.14	1.04
	$T_{1/3}$	9.0	9.0	9.0	10.0	9.0	10.0	10.0
도 달 파 랑	파고	0.52	0.76	0.88	0.96	0.83	1.05	0.83
	주기	9.0	9.0	9.0	10.0	9.0	10.0	10.0
	파향	N45.38E	N78.40E	S24.62E	S22.53E	S190.3E	S62.23W	N81.52W

(3) 해안선변형 재현기간

수치모형실험의 입력제원에 적용된 연간 재현기간은 해양연구원에서 제시된 장기파랑산출자료(한국해양연구원, 2003) 중 파향별 파고계급별 출현빈도 및 주기별 파고계급별 출현빈도 표-3.2, 3.3을 이용하여 산정하였으며, 실험은 5년간의 계산결과를 나타내었다.

표-3.17 연간 파향별 해안선변형 계산일수 산정

구분 \ 파향	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	비 고
연간 해안선 변형 계산일수 (일/년)	5.5	3.2	3.6	5.2	20.8	68.9	33.3	

(4) 해안선의 독취

기존의 지형측량 및 해도자료는 측량 목적상 해안선의 위치를 알아내기 위해 수행된 것이 아니기 때문에 해안선변형 수치모형실험을 수행하는데

이러한 자료로부터 해안선을 독취하여 사용하는 것은 계산의 정도 등 여러 가지 곤란한 점이 존재한다. 따라서, 본 수치모형실험에서는 본 연구에서 수행된 해안선 측량결과를 입력제원으로 계산을 수행하였다.

3.3.3 사용모형

일반적으로 연안표사량은 쇄파점에서 파고와 파향에 연결되어 있기 때문에 굴절이나 회절계산을 하여 해안선에 따라 이들의 값의 변화를 분명히 하여야 한다. 본 연구에서 사용한 해안선변형 수치모형은 연안표사량의 장소적 변화와 해안선의 전진 또는 후퇴를 연결시키는 연속식에 근거하여 그 변화를 산정하는 방법이다.

해안선 변형모형은 연안표사량을 주체로 하는 해빈의 모래이동량과 해안선 위치의 변화율을 간단한 토사량 보존법칙에 근거하여 관계지은 것이다. 일반적으로 해빈의 침식 혹은 퇴적변화는 해안선 위치로부터 먼 바다쪽의 어떤 수심까지 미치지만, 본 모델은 해빈 전체의 변화를 1개의 해안선의 변화로 대표시킨다는 점으로부터 One-Line모델(Pelnard-Considere, 1956)로도 불려지고 있다. 그림-3.31은 해안선변형 수치모형실험의 흐름도이다.

그림-3.32(a)에 나타난 것과 같이 해안선을 Δy 간격의 Section으로 분할하고, 각 Section마다 시간 Δt 사이의 토사량 변화 Δv 를 고려한다. 이 경우 해저사면은 수심 D_s 까지 경사를 바꾸지 않고 평행이동하는 것으로 가정하며, 해안선의 변화량을 Δx_s 로 한다. 각 Section의 토사량 변화율 $\Delta v / \Delta t = D_s \cdot \Delta x \Delta y / \Delta t$ 는 그림-3.32(b)에 나타내듯이 4단면으로부터 유입·유출하는 토사이동량으로 결정한다. 따라서, 해안선의 위치 x_s 와 토사이동량과의 관계식을 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial x_s}{\partial t} + \frac{1}{D_s} \left(\frac{\partial Q}{\partial y} - q \right) = 0 \quad (3.40)$$

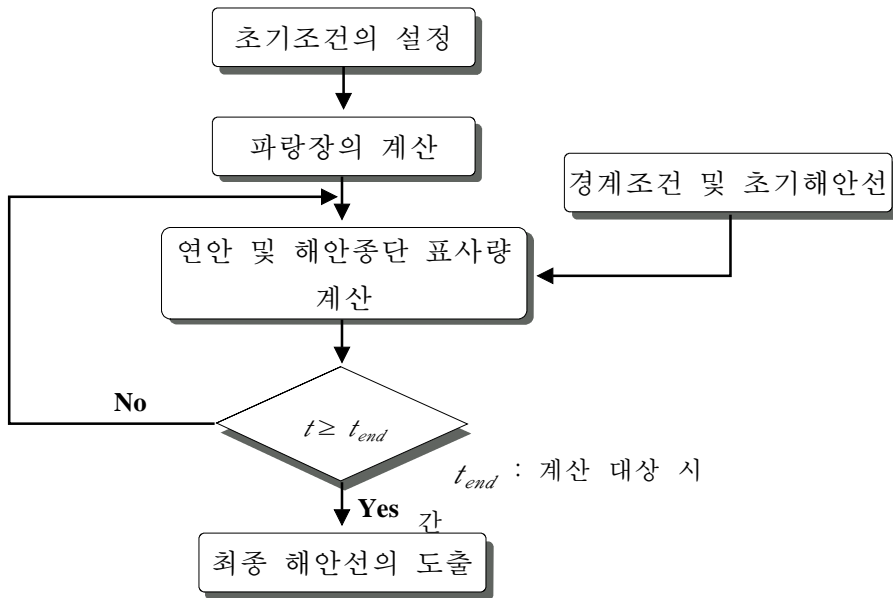


그림-3.31 해안선 변형 수치모형실험의 흐름도

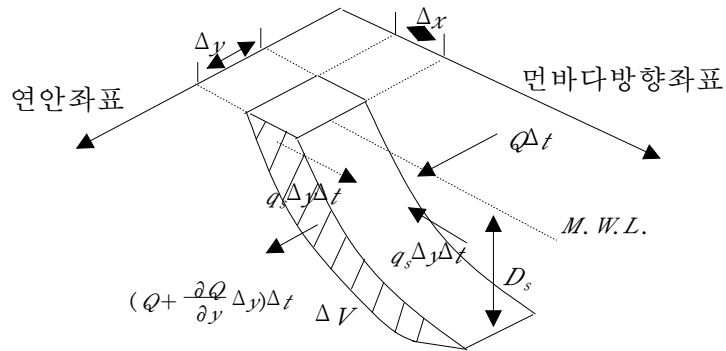
여기서, Q 는 공극을 포함하는 연안표사량(m^3/s)이고, D_s 는 표사대 연단에서 수심이다. 또한, q 는 종단방향의 토사이동량으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q = q_s + q_o \quad (3.41)$$

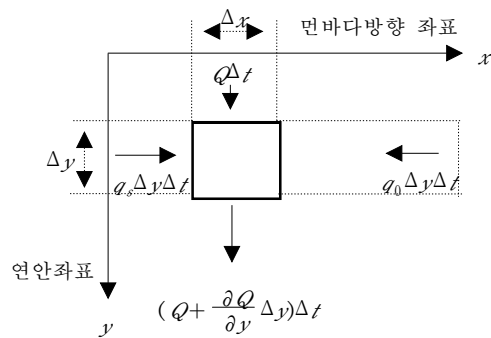
여기서, q_s 는 해안쪽 단면으로부터 각 Section으로 유입 혹은 역으로 유출하는 단위폭당의 토사이동량($m^3/s/m$)이고, 유입량을 양으로 정의하였으며, 하천 공급토사량 혹은 해안쪽으로부터의 인위적인 토사의 채집 등을 나타낸다. 또한, q_o 는 먼바다쪽 단면으로부터 유·출입하는 토사이동량(m^3/s)이다.

해안선 방향의 Q 및 q 의 분포가 얻어지면, 적당한 측방경계조건하에서

식(3.40)을 수치적으로 품으로서 해안선의 시간변화를 축차계산할 수 있다.



(a) 좌표계



(b) 유·출입 토사량

그림-3.32 해안선 변화량과 모래 이동량의 관계

3.3.4 실험결과

해안선변형 수치모형실험은 해안선 변화의 이력을 토대로 해안선 변화의 양상에 대해서 Calibration과정을 수행한 후, 5~10년 이상의 비교적 긴 Scale에 대해서 계산하는 것이 일반적이지만, 연구대상의 해역에서는 잠재,

거북섬 근방에 이안제 등의 구조물이 신설되었으며, 이에 따른 과거의 해안선조사 자료가 미비하여 수치모형실험의 Calibration과정을 수행할 수 없었다. 따라서, 본 수치모형실험에서는 현재까지의 정성적인 해안선변화 양상을 토대로 5년간의 계산을 수행하였다.

본 수치실험에서는 대상해역에서 구조물의 설치이전(과거안)과 잠제설치시 및 잠제+돌제설치시에 대해 해안선변형 수치모형실험을 실시한 결과이다. 그림-3.33~3.35의 해안선변형 수치모형실험 결과는 각 과항별로 재현기간 5년에 대해 계산된 해안선변화량을 모두 합하여 나타내었고, 그림-3.36~3.38에 송도해수욕장 해안의 해안선변형 수치모형실험의 결과와 해안선 변화량을 나타내었다.

그림-3.36에서 수평방향은 기준점으로부터 격자간격 5m로 격자구성한 해안선의 거리를 나타낸 것이며, 격자점 139~162에 암반지역이 위치하고 있다. 과거안에 대한 해안선변형 수치모형실험의 결과에 따르면, 제1사장에서는 침식과 퇴적경향이 미소하게 나타나고, 제2사장에서는 중앙부 해안측에서 5년간 해안선 변화량이 가장 높게 나타난다. 더불어, 해빈폭이 감소하는 침식현상이 나타나고, 제2사장의 서측끝단에서는 퇴적되는 현상이 나타남을 알 수 있다.

잠제 설치시와 돌제 설치시의 해안선변화는 크게 차이나지 않지만, 제2사장 중앙부의 침식되는 부분이 감소하는 것을 볼 수 있었고, 동측끝단에 나타난 침식현상이 잠제설치로 인해 사라진 것을 알 수 있다. 이로부터 앞서 수행한 해빈변형 수치모형실험과 지형변동 수치모형실험의 결과에서와 같이 잠제로 인한 파고감쇠효과가 탁월하다는 것을 알 수 있다.

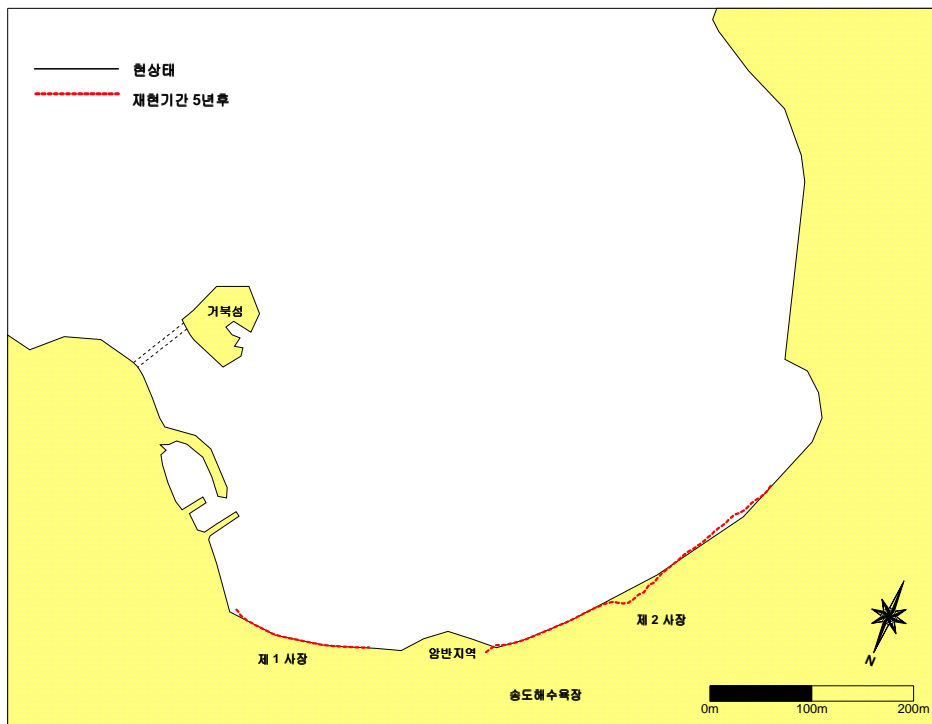


그림-3.33 해안선변화 수치모형실험결과 (과거안)

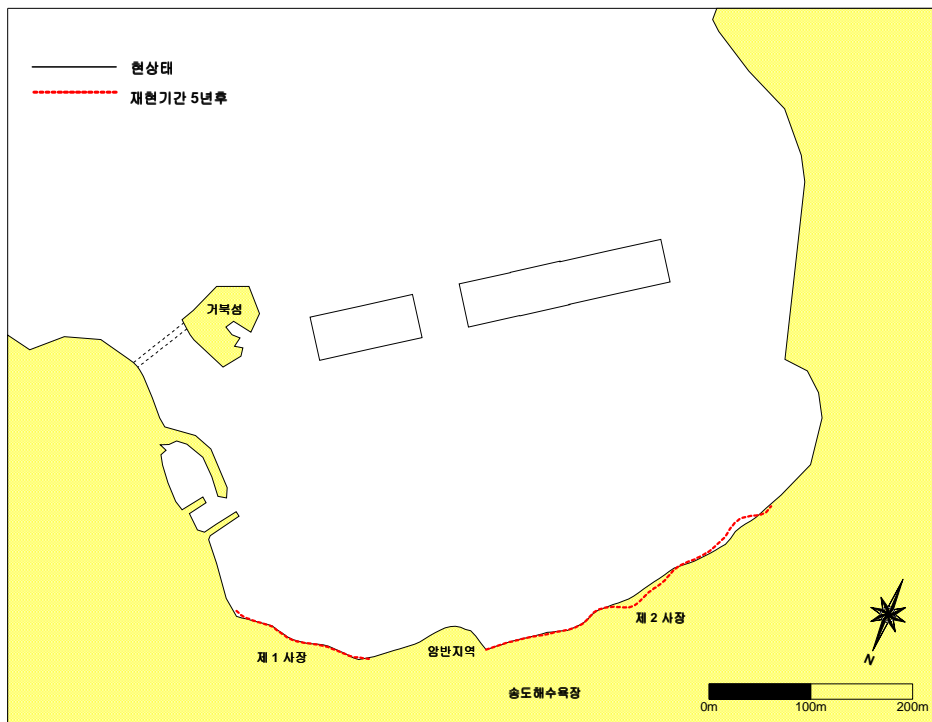


그림-3.34 해안선변화 수치모형실험결과 (잠제설치시)

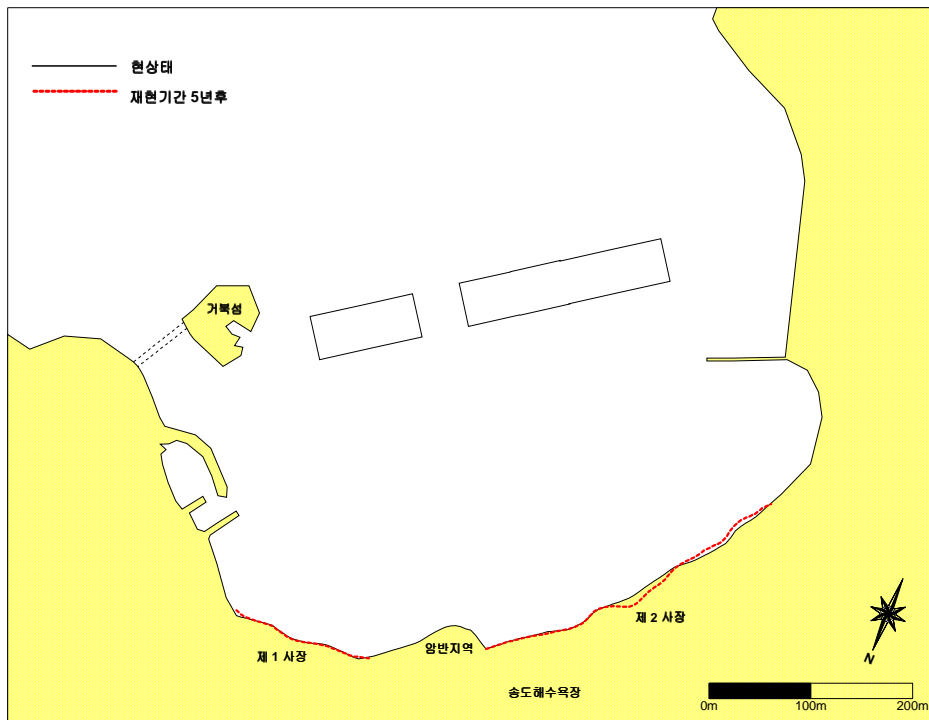


그림-3.35 해안선변화 수치모형실험결과 (잠제+돌제설치시)

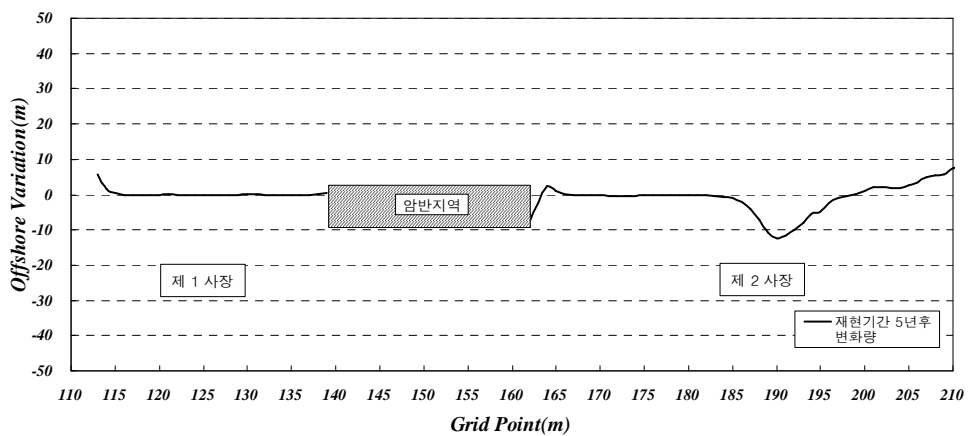


그림-3.36 해안선변화 수치모형실험의 변화량 (과거안)

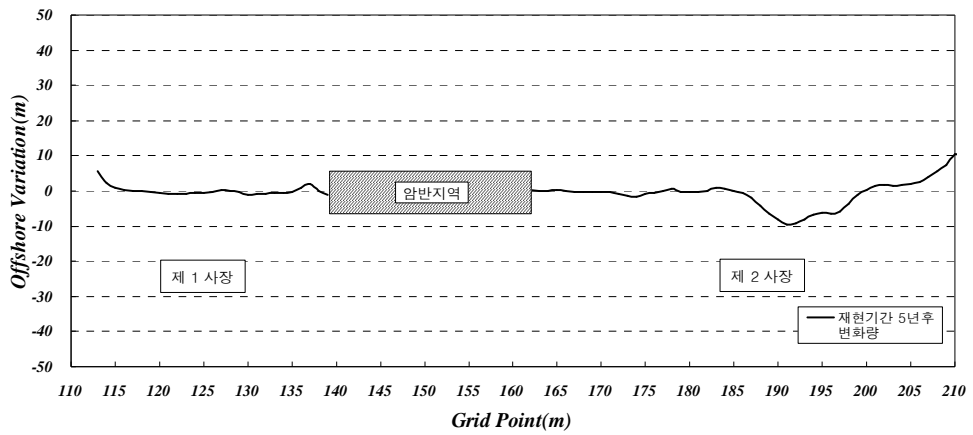


그림-3.37 해안선변화 수치모형실험의 변화량 (잠제설치시)

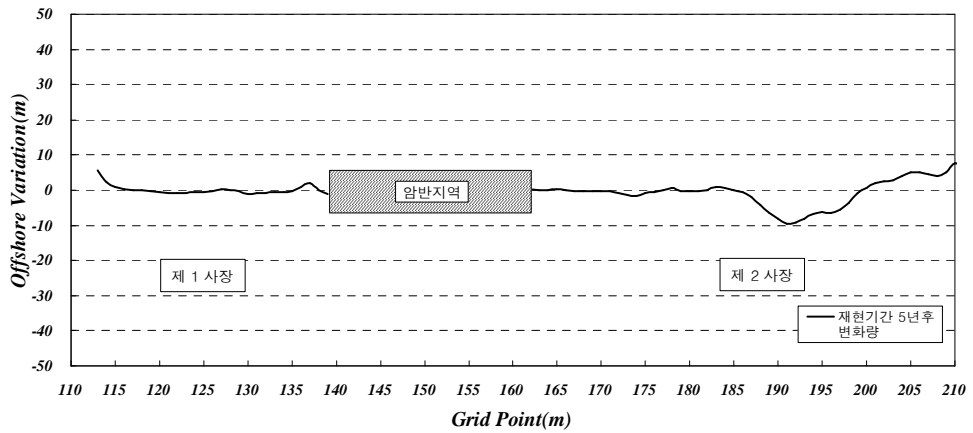


그림-3.38 해안선변화 수치모형실험의 변화량 (잠제+돌제설치시)

제4장 결론

4.1 파랑에 의한 해빈변형 수치모형실험

○ 천해역 파랑변형 수치모형실험결과를 살펴보면 SSE파향의 경우, 입사한 파랑이 섬 등 차폐물에 차단되지 않기 때문에 파고감쇠효과가 작게 나타났으며, 이 때 송도해수욕장 입구부에서의 파고는 1.07m~1.19m로 나타나고 있다.

○ 잠제설치시와 잠제+돌제설치시의 파랑변형 수치모형실험결과, 잠제에 의해 SSE파향에서 잠제 전면의 파고가 1.0m에서 잠제의 파고감쇠효과로 인해 잠제 후면의 파고가 0.5m로 약 50%의 파고감쇠율이 나타났다. 돌제 배후면에서의 파고감쇠는 0.1m~0.2m로 나타났으며, 돌제 배후면에서 해안측으로 165m정도 떨어진 구간까지 파고감쇠효과가 나타났다.

○ 과거 송도해수욕장에 발생되던 국소적 Vortex현상과 그로 인해 발생되던 이안류 현상은 잠제설치후 서측해역으로 빠져나가는 흐름으로 바뀌어 전면해역에 나타나는 해빈류가 매우 약해진 것으로 나타났다.

○ 또한, 잠제의 설치로 인해 잠제 전면부에서 쇄파가 발생하고, 흐름은 외해에서 잠제 중앙부로 들어오는 흐름과 끝단에서 Vortex현상이 생기면서 서측해역으로 빠져나가는 흐름이 발생한다. 그리고, 잠제를 통해 내해에서 외해로 빠져나가는 흐름이 발생함을 볼 수 있다. 따라서, 송도연안에 축조된 잠제는 파고감쇠측면에서 송도연안의 침식방지에 크게 기여할 것으로 추측된다.

○ 돌제설치후 잠제설치 이전과 흐름의 변화는 크지 않지만 돌제로 인한 파랑감쇠효과 때문에 송도해안 서측해역으로 흐르던 미소한 흐름들이 현저히 사라지고 서측해안으로 돌아가는 흐름 때문에 송도연안 정비사업에서

계획된 양빈사의 유실을 저감시킬 수 있을 것이다.

○ 과거 상태에 대한 지형변동 실험결과, 해안의 **Vortex**의 흐름에 의해 침식·퇴적구간이 나타났고, 해빈류의 흐름보다는 파랑에 의해 해안 중앙부가 침식이 된 것으로 판단된다. 해안부분에서 쇄굴이 많이 발생하여 침식이 되며 이로 인해 서측해안 끝단에서 퇴적되는 양상을 보이는데, 이는 해저지형 경사가 작기 때문에 일어나는 현상으로 판단된다.

○ 잠제설치시 잠제에 의한 영향으로 내습하던 파랑이 감쇠되어 내해쪽의 쇄굴·퇴적이 거의 나타나지 않았다. 잠제로 인해 내습하는 파랑이 작기 때문에 과거 송도해수욕장 전면해역에서 나타났던 침식·퇴적현상은 거의 사라지고 잠제 전면에서 쇄굴현상이 나타남을 알 수 있었다. 이것으로 보아 잠제에 의한 파고감쇠효과가 탁월한 것을 알 수 있었다.

○ 잠제설치시와 잠제+돌제설치시에 대한 지형변동 실험결과는 돌제에 의한 쇄굴·퇴적이 크게 나타나지 않았고, 돌제 내측구간에서는 해빈류가 감쇠되어 양빈사의 유실을 저감시킬 수 있을 것이라 추측되나, 모니터링을 통한 지속적인 검토가 필요하며, 지형상황을 보다 면밀히 파악하고 수치실험을 수행하여야 할 것이다.

4.2 해수유동 및 퇴적물이동 수치모형실험

○ 조위진폭에 대해서는 관측치가 40.0cm, 수치계산결과는 38.6cm로써 관측치와 미소한 차이를 나타내고 있으나, 대상해역에서의 조석특성을 비교적 잘 재현하고 있는 것으로 판단된다. 또한, 지각(**Phase**)에 대해서도 관측치와 계산치에 미소한 차이는 있으나 대체적으로 대상해역의 조석특성을 잘 재현하고 있는 것으로 나타났다. 따라서, 본 수치모델은 대상해역에서의 조위변동특성을 잘 재현하고 있다고 생각된다.

- 해수유동 수치계산결과에 의하면 낙조류가 창조류보다 우세하며, 낙조류의 지속시간이 창조류보다 길게 나타났다.

- 광영역의 계산결과를 바탕으로 상세역에서의 해수유동 수치계산을 실시하여 송도해수욕장 인근해역에 대한 해안수리학적 영향을 검토하였다. 상세역 모델에 의한 해수유동 수치실험 계산결과를 보면, 송도해수욕장은 동측으로부터 서측해안으로의 흐름이 탁월하며, 외해측의 유속은 1.0~3.0m/s, 만내의 유속은 1.0m/s~0.5m/s, 잠재 내측의 경우 0.5m/s 미만으로 나타났다.

- 상세역의 계산결과에 의하면 송도해수욕장내의 조류속은 해변류장에 비해 작은 것으로 나타났으며, 따라서 해수욕장내의 구조물 설치에 의해 해수유동에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단된다. 한편, 추후 관측결과를 바탕으로 송도해수욕장의 양빈 및 지형변동의 영향에 따른 해수유동 및 퇴적물이동에 미치는 영향에 대해 검토할 필요가 있을 것으로 판단된다.

4.3 해안선변화 수치모형실험

- 해안선변형 수치모형실험은 해안선 변화이력을 토대로 해안선변화 양상에 대해서 Calibration과정을 수행한 후, 5~10년 이상의 비교적 긴 Scale에 대해서 계산하는 것이 일반적이지만, 대상해역에서는 잠제, 거북섬 이안제 등의 구조물이 신설되었으며, 이에 따른 과거의 해안선조사 자료가 미비하여 수치모형실험의 Calibration과정을 수행할 수 없었다. 따라서, 본 수치모형실험에서는 현재까지의 정성적인 해안선변화 양상을 토대로 5년간의 계산을 수행하였다.

- 과거안에 대한 해안선변형 수치모형실험 결과에 따르면, 제1사장에서는 침식과 퇴적경향이 미소하게 나타나고 있으며, 제2사장에서는 중앙부 해안측에서 5년간 해안선 변화량이 가장 높게 나타났다. 그리고, 해변쪽이 감소하는 침식현상이 나타났고, 제2사장의 서측끝단에서는 퇴적이 되는 현상이

나타남을 알 수 있었다.

○ 잠제설치시와 돌제설치시의 해안선변화는 크게 차이는 나지 않지만, 제 2사장 중앙부의 침식되는 부분이 감소하는 것을 볼 수 있었고, 동측끝단에 나타난 침식현상이 잠제설치로 인해 사라진 것을 알 수 있다. 이로부터 앞서 수행한 해빈변형 수치모형실험과 지형변동 수치모형실험의 결과에서와 같이 잠제로 인한 파고감쇠효과가 탁월하다는 것을 알 수 있었다.

○ 해안선 변화이력을 토대로 해안선변화 양상에 대해서 보다 더 면밀한 Calibration과정이 필요할 것으로 판단된다.

<참고문헌>

- [1] 부산광역시 서구청 (2002) : 송도일원 침식방지공사 기본 및 실시설계 용역 보고서.
- [2] 정승진 (2002) : 항공사진을 이용한 장기해안선변화 해석 연구, 박사학위논문, 명지대학교.
- [3] 한국해양연구원 (2003) : 파랑모델 산출자료.
- [4] Bagnold, R. M. (1963) : Mechanics of marine sedimentation, The Sea(ed. by M. N. Hill), Vol. 3, Interscience, New York, pp.507-528.
- [5] Hunt, I. A. (1957) : Design of seawall and breakwaters, Proc, Amer. Soc. Civil Eng., Vol. 85(ww3), pp.123-152.
- [6] Karlsson, T. (1969) : Refraction of continuous ocean wave spectra, J. Waterways and harbors Division, Proc. ASCE, Vol. 95, pp.437-448.
- [7] Matsuno, T. (1996) : Numerical integrations of the primitive equations by a simulated backward difference method, J. Meteorological Society of Japan, SerII, Vol. 44, Np.1, pp.76-84.
- [8] Pelnard-Considere, R. (1956) : Essai de Theorie de l'Evolution des Formes de Vivage en Plages de Sable et de Galets, 4th Journess de l'Hydraulique, Les Energies de la Mer, Question

3, Rapport No.1, pp.289-298.

- [9] Watanabe, A. and Maruyama, k. (1984) : Numerical Analysis of Combined Refraction, Diffraction and Breaking, Proc. 31st Coastal Eng. Conf., JSCE, pp.103-104.

- [10] 合田良實 (1975) : 浅海域における波浪の碎波変形, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第3号, pp.59-106.

- [11] 岩佐義郎, 井上和也, 劉樹伸, 阿部徹 (1983) : 琵琶湖湖流の三次元的な解析, 東部大學防災研究所年報, 第26号, B-2, pp.531~542.

감사의 글

우리나라 최초로 개장된 부산송도해수욕장의 복원사업인 송도연안정비사업의 설계 및 공사를 시행해야하는 사업발주부서의 책임자로서 참으로 많은 고민을 했습니다. 그러나 아낌없는 조언과 많은 도움을 주신 많은 분들이 있었기에 새롭게 태어난 오늘의 부산송도해수욕장의 성공적인 성과가 기꺼이 가능했고, 본 논문을 빌어 그 분들께 진심으로 감사의 마음을 전합니다.

송도연안정비사업의 시작부터 지금까지 원만한 수행을 할 수 있게끔 많은 도움뿐만 아니라 본 사업을 수행하면서도 평소 많은 부분에서 부족하다고 느낀 저에게 바다와 친밀해질 수 있는 연안이 무엇인지에 대해 깊은 관심을 심어주시고, 그와 관련하여 적지 않은 나이에 해안공학이라는 학문을 공부할 수 있게끔 기꺼이 길을 열어 주신 김도삼 교수님께 이 자리를 빌어 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

그리고 비록 지금은 고인이 되셨지만 송도연안정비사업이 성공적으로 마칠 수 있도록 항상 따뜻한 말씀과 조언을 아끼지 않으셨던 양윤모 박사님께 이 자리를 빌어 감사의 말씀을 드리며, 부산송도해수욕장이 다시 거듭날 수 있도록 아낌없는 관심과 많은 자문을 해주신 여러 교수님들께도 진심으로 감사의 말씀을 드립니다.

본 논문이 좀 더 좋은 모습을 갖추 수 있도록 각별한 지도와 충고를 아끼지 않으신 김태곤 교수님, 김태형 교수님께 감사의 말씀을 드리며, 평소 큰 관심으로 지켜봐주신 경갑수 교수님, 이중우 교수님께도 감사의 마음을 전합니다.

연구실에서 불철주야 학문을 익히면서도 본 논문을 위하여 자료수집뿐만 아니라 현지관측과 같은 노고에도 불구하고 성심껏 도와준 관동대학교 대학원생들과 인제대학교 대학원생들께도 깊은 감사의 마음을 전합니다. 또한 본 논문이 탈고 될 수 있도록 마지막까지 함께한 김창훈, 김지민, 이상기군을 비롯한 한국해양대학교 해안공학연구실원에게도 그 동안의 노고에 고마움을 전합니다.

직장생활을 하면서 만학을 물심양면으로 도와주시고 격려를 아끼지 않으신 구청장님을 비롯한 간부님들과 동료직원들에게도 진심으로 감사의 뜻을 표합니다.

평소 남편의 바쁜 일과에도 싫은 내색보다는 항상 고마운 말로써 큰 용기를 주고, 언제나 큰 버팀목으로 함께해준 사랑하는 부인에게도 이 자리를 통해 그 동안의 미안한 마음과 함께 진심으로 감사의 마음을 전합니다. 그리고 항상 아버지의 큰 희망이 되어준 사랑하는 딸 윤선이에게도 고마움을 전합니다.